

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Інженерно-хімічний факультет
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

«На правах рукопису»

УДК 66.096.5

До захисту допущено

Завідувач кафедри, д-р. техн. наук, проф.

Я.М. Корнієнко

“ _____ ” _____ 2019 р.

МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ

зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування
спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних і нафтопереробних
виробництв»
на тему: **Гідродинаміка неоднорідного псевдозрідження**

Виконав: студент VI курсу, групи ЛН-71мн

Денисенко Владислав Русланович

(підпис)

Науковий керівник: завідувач кафедри машин та апаратів
хімічних і нафтопереробних виробництв,

доктор технічних наук, професор Я. М. Корнієнко

(підпис)

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних
ситуаціях, канд. техн. наук, доцент І. М. Ковтун

(підпис)

Консультант з розроблення стартап-проекту, доцент кафедри
промислового маркетингу, канд. екон. наук Н. В. Юдіна

(підпис)

Рецензент: завідувач кафедри екології та технології рослинних
полімерів, доктор технічних наук, професор М. Д. Гомеля

(підпис)

Рецензент: старший науковий співробітник відділу термічних
гетерогенних процесів Інституту газу НАН України, кандидат
технічних наук В. В. Собченко

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____ В.Р. Денисенко

РЕФЕРАТ

УДК 66.096.5

Магістерська дисертація на тему: «Гідродинаміка неоднорідного псевдозрідження» / НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»; Науковий керівник Я.М. Корнієнко. – К., 2019. – ____ с. Виконавець – В.Р. Денисенко.

Об'єкт дослідження: гідродинаміка при пульсаційному псевдозрідженні.

Предмет дослідження: якісні характеристики гідродинаміки неоднорідного псевдозрідження при грануляції.

Метою роботи є встановлення закономірностей процесу неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі при підвищених висотах шару зернистого матеріалу та розроблення методики розрахунку промислових апаратів для грануляції.

Сформульовано принцип взаємодії газового суцільного середовища із зернистим матеріалом для реалізації струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження при $z_{\phi}/H_0 \leq 0,21$.

Експериментально визначено порозності в зонах камери гранулятора при неоднорідному псевдозрідженні в автоколивальному режимі при п'ятикратному перевищенню висоти нерухомого шару H_0 висоти пробою газового струменя z_{ϕ} .

Експериментально досліджено вплив висоти зернистого матеріалу на динаміку зміни порозності та індекс перемішування в базових зонах апарату.

Підтверджено дослідженнями, що процес грануляції при застосуванні неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження за підвищених висот шару зернистого матеріалу призводить до інтенсифікації тепломасообмінних процесів в 1,6 рази в порівнянні із барботажем.

НЕОДНОРІДНЕ СТРУМЕНЕВО-ПУЛЬСАЦІЙНЕ
ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ, АВТОКОЛИВАЛЬНИЙ РЕЖИМ, ГУМІНОВО-
МІНЕРАЛЬНІ ДОБРИВА, ГІДРОДИНАМІЧНА ЯКІСТЬ, ПУЛЬСАЦІЇ.

РЕФЕРАТ

УДК 66.096.5

Магистерская диссертация на тему: «Гидродинамика неоднородного псевдооживления» / НТУУ «КПИ имени Игоря Сикорского»; Научный руководитель Я.М. Корниенко. – К., 2019. – ____ с. Исполнитель – В.Р. Денисенко.

Объект исследования: гидродинамика при пульсационном псевдооживлении.

Предмет исследования: качественные характеристики гидродинамики неоднородного псевдооживления при грануляции.

Целью работы является установление закономерностей процесса неоднородного струйно-пульсационного псевдооживления в автоколебательном режиме при повышенных высотах слоя зернистого материала и разработка методики расчета промышленных аппаратов для грануляции.

Сформулирован принцип взаимодействия газовой сплошной среды с зернистым материалом для реализации струйно-пульсационного режима псевдооживления при $z_{\phi}/H_0 \leq 0,21$.

Экспериментально определено порозности в зонах камеры гранулятора при неоднородном псевдооживлении в автоколебательном режиме при пятикратном превышении высоты неподвижного слоя H_0 высоты пробоя газового факела z_{ϕ} .

Экспериментально исследовано влияние высоты зернистого материала на динамику изменения порозности и индекс перемешивания в базовых зонах аппарата.

Подтверждено исследованиями, что процесс грануляции при применении неоднородного струйно-пульсационного псевдооживления при повышенных высотах слоя зернистого материала приводит к интенсификации тепломассообменных процессов в 1,6 раза в сравнении с барботажным.

НЕОДНОРОДНОЕ СТРУЙНО-ПУЛЬСАЦИОННОЕ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ, АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ, ГУМИНОВО-МИНЕРАЛЬНЫЕ УДОБРЕНИЯ, КАЧЕСТВО ГИДРОДИНАМИКИ, ПУЛЬСАЦИИ.

THE ABSTRACT

UDC 66.096.5

Master's thesis on the topic: «Hydrodynamics of non-uniform fluidization» / NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Leader Y. Korniyenko.– K., 2019. – ____ p. The performer – V. Denysenko.

The object of the research: the hydrodynamics during the pulsation fluidization.

The subject of the research: quality characteristics of hydrodynamics of nonuniform fluidization during the granulation process.

The aim of the work is establishment of the regularities of the process of non-uniform fluidization in the application of pulsation in self-oscillating mode at elevated height of a layer of granular material and development of methods of calculation of industrial machines.

Formulated the principle of interaction of a gas continuous medium with a granular material for the realization of jet pulsation mode of fluidization in $z_f/H_0 \leq 0,21$.

Experimentally determined voids in the areas of camera granulator in self-oscillating mode of fluidization when a fivefold excess of the height of the fixed bed height H_0 of the breakdown of the gas jet z_f .

Experimentally investigated the influence of the height of granular material at the dynamics of void and the index of mixing in the core zones of the apparatus.

The study proves that the granulation process in the application of a nonuniform jet-pulsed fluidization at elevated heights of a layer of granular material leads to intensification of heat and mass transfer processes in 1,6 times in comparison with barbotine.

INHOMOGENEOUS JET PULSATION OF FLUIDIZATION, SELF-OSCILLATING MODE, HUMIC-MINERAL FERTILIZERS, QUALITY OF HYDRODYNAMICS, PULSATION.

ВСТУП

Актуальність теми

Актуальною проблемою сучасності є збереження родючості ґрунтів. Стан сільськогосподарських земель є головним чинником, який забезпечує сталий розвиток суспільства. За останні роки в результаті збільшення виносу елементів живлення сільськогосподарськими культурами без їх повернення у вигляді добрив, дефіцит поживних речовин удвічі збільшився та становить понад 140 кг на гектар площі посівних полів [1].

Саме тому для збереження родючості ґрунтів, необхідно застосування нового покоління гуміново-мінеральних добрив, котрі містять б мінеральні поживні речовини та стимулюючі гумінові речовини у співвідношеннях, які визначаються екологічними та агрокліматичними умовами регіону застосування [2]. Однією з вимог до гранульованих добрив є рівномірне розподілення мінеральних та гумінових складових по всьому об'єму гранули.

Для виконання цього доцільно проводити гранулювання композитних рідких систем із застосування техніки псевдозрідження. Стійкість кінетики процесу грануляції визначається гідродинамічним режимом. Тому розробка способу взаємодії газового теплоносія із зернистим матеріалом, що забезпечує підвищення інтенсивності тепломасообміну при грануляції рідких систем дозволить вирішити важливу науково-технічну задачу створення ефективного технологічного обладнання, що підтверджує актуальність теми дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана згідно тематичних планів кафедри МАХНВ НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» за напрямом підготовки кадрів освітнього рівня «магістр» за спеціалізацією «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв».

Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей процесу неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі при підвищених висотах шару зернистого матеріалу та розроблення методики розрахунку промислового апарату.

Об'єкт дослідження: гідродинаміка при пульсаційному псевдозрідженні.

Предмет дослідження: якісні характеристики гідродинаміки неоднорідного псевдозрідження при грануляції.

Методи досліджень: спостереження, проведення експерименту на лабораторній установці, фізичне та математичне моделювання процесу грануляції в апаратах з неоднорідним псевдозрідженим шаром при підвищених шарах зернистого матеріалу.

Задачі дослідження

Для досягнення мети магістерської дисертації потрібно виконати наступні задачі:

1. Обґрунтувати фізичну модель взаємодії газу із зернистим матеріалом при реалізації пульсаційного псевдозрідження;
2. Скласти математичну модель взаємодії газового струменя з твердими частинками при неоднорідному псевдозрідженні;
3. Встановити параметри струменево-пульсаційного псевдозрідження при мінімізації ризику утворення застійних зон на поверхні ГРП при 5-ти кратному перевищенню висоти шару висоти пробою газового факела;
4. Провести оцінку якості гідродинаміки пульсаційного режиму псевдозрідження.
5. Перевірити адекватність фізичної та математичної моделей у автоколивальному режимі при неоднорідному псевдозрідженні;
6. Експериментально визначити вплив висоти шару зернистого матеріалу на частоту пульсацій та індекс перемішування;

Науковою новизною є:

- Науково обґрунтовано умови взаємодії газового суцільного середовища із зернистим матеріалом для реалізації струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження при $z_{\phi}/H_0 \leq 0,21$;
- Експериментальне визначення порозності в робочих зонах камери гранулятора при неоднорідному псевдозрідженні в автоколивальному режимі при п'ятикратному перевищенню висоти нерухомого шару H_0 висоти пробою

газового струменя z_{ϕ} ;

- Результати експериментальних досліджень характеристик неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі при різних початкових висотах;

- Результати експериментальних досліджень процесу грануляції при застосуванні неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження за підвищених висот шару зернистого матеріалу.

Публікації

Результати досліджень наведено у 12 опублікованих наукових працях: 2 статті у фахових виданнях України, 7 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях та 2 деклараційні патенти України на корисну модель, 1 подана заявка.

1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Базові принципи сталого розвитку

Сталий розвиток є основною парадигмою в галузях народного господарства, економіки та промисловості. Його головні принципи спрямовані на взаємозв'язок між охороною довкілля, стабільністю в соціумі та ростом економіки. Перехід до концепції раціонального користування природними ресурсами, підтримка їх стабільного відновлення є одним з ключових завдань створення умов прогресивного розвитку [3].

Питанням дослідження розвитку суспільства присвячені роботи Д. Мелоуза, Й. Рандерса, А. Кінга, а також видатного українського вченого В. І. Вернадського, який увів поняття ноосфери як середовище людської діяльності. В подальшому було сформульовано триєдину концепцію сталого розвитку, котра ґрунтувалася на гармонізації взаємовідносин між суспільством та середовищем на основі принципу екологізації.

Проте, останніми роками перед людством виникла проблема подальшого існування та виживання. Причиною цьому є вплив багатьох чинників основним з яких вважається гонитва за світовим лідерством в сфері економічного зростання. Це призвело до зменшення природніх ресурсів, екологічної кризи, несприятливої демографічної ситуації, голоду, постійних війн з масовим знищенням людей. За даними німецького фонду «Населення Землі» (DSW) станом на 2018 рік, населення нашої планети становило 7,635 млрд., це на 83 млн. більше ніж за 2017. До 50 року прогнозується стрімке демографічне зростання до 9 млрд людей. Це стане приводом для зростання попиту на сільськогосподарську продукцію як сировину для продовольчих товарів [4].

Інститутом прикладного системного аналізу НТУУ «КПІ імені Ігоря сікорського» було запропоновано комплексну систему вимірів сталого розвитку на підставі економічного, екологічного та соціального розвитку [5].

З огляду даних станом на 2017 рік Україна посідає 88 місце за сумарним індексом сталого розвитку з 193 країн світу [5]. В той же час на території нашої

держави зосереджено до 20% світових запасів чорнозему. Але Україна має недосконалу модель ведення сільського господарства. Причиною цьому є надмірна розораність земель, що не має аналогів у світі. Ступінь розораності територій в Україні сягає понад 54% від всього земельного фонду, що зумовило значне техногенне навантаження на екологічну сферу [6].

За останні десятиліття по всій території України спостерігається зменшення вмісту гумусу в ґрунтах (на 0,5-0,6 т/га щорічно), що є основним показником його родючості, рисунок 1.1 [5, 6].

Рисунок 1.1 – Характеристика ґрунтів України за вмістом гумусу [6]

Варто взяти до уваги загрозу можливого прискорення дегуміфікації ґрунтів внаслідок розвитку процесів вітрової та водної ерозій, що також призводить до виносу гумінових речовин з посівних земель [6].

Тож важливим чинником підвищення продуктивності ґрунту є їх удобрення. Для підтримання необхідного балансу гумусу та поживних органічних компонентів, у ґрунт вносять мінеральні добрива (N, P, K, Ca). Але через, підняття ціни та негативний вплив на екологію широкого використання набувають гуміново-мінеральні добрива пролонгованої дії із заданими властивостями, які містять поживні речовини органічного матеріалу, природні мінерали та біологічно активні сполуки, необхідні для нормального розвитку рослин в період вегетації [7].

Гуміново-мінеральні добрива є альтернативою для підвищення факторів врожайності. До того ж, користь від їх використання є значно більшою та ефективнішою. Такі добрива швидко засвоюються рослинами, оскільки містять мікро та макроелементи у легкодоступній для рослин формі. Також існує економічна перевага в порівнянні з мінеральними через значно менші витрати на гектарну норму [7].

1.2 Роль гуміново-мінеральних добрив у збереженні родючості ґрунтів

Сучасні методи ведення сільськогосподарських приплодів до щорічного зменшення гумінових речовин на оброблюваних землях України у розмірі 320-560 кг/га, що майже вдвічі перевищує цей показник за попередні 80 років. Дивлячись на досвід західноєвропейських країн по відновленню родючості ґрунтів шляхом внесення лише мінеральних речовин (близько 300 кг/га) свідчить, що це призводить до стрімкої деградації ґрунтового покриву через їх надмірну мінералізацію та сприяє стрімкій дегуміфікації. Тому необхідною умовою збереження відтворювальної здатності орних земель є внесення комплексних гуміново-мінеральних добрив пролонгованої дії [8].

Утворення гумінових речовин пов'язано з процесом перетворення залишків промислового та органічного походження за рахунок біохімічного розкладу. Спостереження дають змогу стверджувати, що гумінові добрива покращують фізико-механічні властивості ґрунтів, водопроникність, зменшуючи густину ґрунту. Також на 30% стабілізують капілярну вологостійкість земель [8].

До складу гумінових речовин входять: гумінові кислоти, фульвокислоти та їх солі, гуміни (поєднання мінералів із сполуками гумінових кислот) [8].

В якості сировини для отримання гумінових речовин використовують буре вугілля (з вмістом азоту понад 1%), торф (близько 3% азоту). Подальше оброблення цих речовин водою активізує гумінові речовини, одночасно підвищуючи вміст азоту в добриві на 4,0% [8].

За результатами досліджень було встановлено, що невеликі дози гуміново-мінеральних добрив підвищують співвідношення між агрономічно цінними структурами ґрунтів, що відновлює біологічні показники земель. До того ж, відстежується інтенсифікація мікробіологічної активності на 2 роки після внесення добрив. Ґрунти, в які було внесено речовини гумінового походження, характеризуються кращими умовами азотно-фосфатних режимів через утворення в них гумінових кислот та їх солей. Також виникає ряд переваг в порівнянні із застосуванням мінеральних добрив [8]:

- підвищується рух фосфору у ґрунті;

- збільшується кількість нітратів, що стимулює утворення білкового азоту;
- зростає фотохімічна здатність засвоєння азоту рослиною;
- підвищується концентрація Fe, K, Ca, Mg, що відіграють важливу роль у стійкості рослин до кліматичних змін;
- поліпшується захисні властивості від радіоактивних речовин, пестицидів та гербіцидів.

Загалом гуміново-мінеральні добрива пролонгованої дії забезпечують ефективність використання ресурсів, покращуючи не тільки приріст врожаю, але й поліпшують поживну цінність продукції.

Гуміново-мінеральні добрива представлені у двох формах:

- тверді;
- у вигляді розчинів.

Рідкі добрива мають ряд недоліків з-поміж яких: корозійний вплив на тару, малий термін придатності. Їх виробляють на сільськогосподарських та гідролізних підприємствах, шляхом змішування компонентів в спеціальних апаратах з дозувальними пристроями. Цей процес відбувається перед їх застосуванням, щоб уникнути перелічених недоліків.

Тверді добрива створюють шляхом обкатування, пресування, брикетування та грануляції. Найтипівішими представниками таких добрив є амофоска, нітроамофоска. Вони більш стійкі до злежування та тривалого зберігання, що дає змогу перевозити їх на великі відстані.

Тож розробка процесів виготовлення комплексних гуміново-мінеральних добрив з заданими фізико-хімічними та механічними властивостями, дозволить отримувати високий врожай не спричиняючи шкоди навколишньому середовищу та інтенсифікує процес ґрунтоутворення, що відповідає концепції сталого розвитку.

1.3 Способи одержання гранульованих гуміново-мінеральних добрив

Для поліпшення умов зберігання, транспортування, якісних та механічних характеристик, рідким та сипучим компонентам гуміново-мінеральних добрив надають форму гранул. Це в свою чергу зменшує втрати сировини та готової продукції.

До основних способів грануляції добрив належать [Техн спос гранул.9]:

1. Обкатування. Процес грудкування зволожених матеріалів, без застосування тиску. Подальша обробка зволоженого матеріалу шляхом висушування та випалювання спричиняє утворенню сфероподібних гранул. Даний процес проводять в тарілчастих, барабанних, швидкісних і вібраційних грануляторах, рисунок 1.2 [10].

Недоліком такого обладнання є низька продуктивність, значна відмінність гранульованого матеріалу за розміром.

2. Пресування – отримання гранульованого матеріалу у вигляді брикетів, таблеток або ж плиток за рахунок пресування сухих порошків та подальшим дробленням спресованого матеріалу, рисунок 1.3 [11].

Недоліком даного способу є одержання гранульованої продукції з малою щільністю і міцністю. Досягти заданої міцності можливо шляхом додаткового сушіння, що збільшує затрати енергії на їх виробництво.

- 1 – корзина; 2 – розподільник; 3 – шток; 4 – вал; 5 – підшипниковий вузол;
6 – вібраційний механізм; 7 – ковпак; 8 – патрубок вводу сировини;
9 – кришка; 10 – патрубок подачі пари.

Рисунок 1.2 – Вібраційний гранулятор типу ВВГ [10]

- 1 –об’єми матеріалу, який прокатують; 2 – дозатор;
3 – вихідний матеріал; 4 – зона деформації; 5 – валки; 6 – кінцевий продукт.

Рисунок 1.3 – Вальцевий прес для ущільнення порошків [11]

3. Екструзія - пластифікована маса під тиском продавлюється через спеціальні матриці. Матеріал проходить попередню обробку в змішувачі, де нагрівається до температури розм'якшення та додається рідка фаза.

Недоліком конструкції є малоефективність при роботі з частинками понад 3 мм, що призводить до забивання отворів. Також на якість гранул впливають форми ножів, що зрізають матеріал, рисунок 1.4 [12].

1 – корпус; 2 – завантажувальна камера;

3 – шнек; 4 – формуючі отвори; 5 – ножі; 6 – шнековий вал.

Рисунок 1.4 – Гранулятор екструзійного типу [12]

4. Грануляція з робочих розчинів, що кристалізуються на поверхні гранульованого матеріалу. Метод застосовують для гранулювання добрив з розчинів, пульп і суспензій у барабанних сушарках, рисунок 1.5 [13], і в грануляторах із псевдозрідженим шаром, рисунок 1.6 [14].

Рисунок 1.5 – Барабанний гранулятор-сушарка [13]

DPC – регулятор тиску; DP – датчик тиску;

T – датчик температур; TC – температурний регулятор.

Рисунок 1.6 – Гранулятор із псевдозрідженим шаром [14]

Недоліками наведених способів гранулювання гуміново-мінеральних добрив є:

- 1) багатостадійність процесу (випарка, центрифугування, грануляція);
- 2) великі затрати енергії на проведення процесу створення добрив;
- 3) незадовільна якість виготовленої продукції через недотримання поставлених вимог перед гранульованим продуктом:
 - незлежуваність при тривалому зберіганні та транспортуванні;
 - міцність гранул $> 10H$ / гранулу
 - сфероподібний вигляд;

- розподілення мінеральних, органічних та стимулюючих компонентів по всьому об'єму.

Тому для одержання інноваційних гуміново-мінерально добрив нового покоління пропонується застосувати техніку псевдозрідження. Це дозволить проводити багатостадійний процес в одному апараті, дотримуючись усіх вимог, які вимагають перед гранульованим матеріалом.

Крім того, отримання гранульованої продукції, застосовуючи апарат із псевдозрідженим шаром, при зневодненні та кристалізації рідких систем, супроводжується підвищенням коефіцієнтів перенесення тепла і маси до 50% і більше.

1.4 Техніка псевдозрідження для одержання гранульованих гуміново-мінеральних добрив

Грануляція у псевдозрідженому шарі супроводжується складними тепломасообмінними та гідродинамічними процесами росту гранул, дозволяючи отримати продукт з заданим дисперсним складом та механічними властивостями [ТСГ].

Особливість процесу полягає в застосуванні високотемпературного теплоносія, температура якого перевищує температуру плавлення термолабільних компонентів, що піддаються зневодненню та грануляції. Тому основною умовою стійкого процесу є активний гідродинамічний режим, що забезпечить підвищення інтенсивності тепломасообмінних процесів за рахунок перемішуванню матеріалу між зоною зрошення та зоною контакту газорозподільного пристрою.

В зоні зрошення рідина наноситься на поверхню гранули та за рахунок адгезійно-сорбційних сил утримується на її поверхні у вигляді плівки, яка згодом за рахунок підведення теплоти з теплоносієм (конвективно), теплоти з середини гранул (кондуктивно) та рушійної сили процесу, випаровується утворюючи шар мікрокристалів. За рахунок багаторазового повторення даного процесу

збільшується розмір гранульованого продукту. Характерним є те, що частина речовини не закріплюється на матеріалі, а утворює нові центри грануляції [ТСГ].

Найбільш поширеними механізмами грануляції в псевдозрідженому шарі, рисунок 1.7 [15], є: а) агломераційний; б) капсулювання; в) пошаровий.

Реалізація пошарового механізму утворення гранул з рівномірним розподіленням компонентів по всьому об'єму, при зневодненні та кристалізації з рідких систем, найбільш доцільно застосовувати масову кристалізацію в апаратах з псевдозрідженим шаром.

Схеми основних типів грануляторів з псевдозрідженим шаром для зневоднення рідких систем, рисунок 1.8 [9], класифікують за такими технологічними ознаками:

- за періодичністю процесу: безперервні, періодичні;
- за способом підводу теплового агенту: конвективні та конвективно-кондуктивні;
- за кількістю секцій камери гранулятора: одно- та багатосекційні;
- тип корпусу: циліндричний, конічний, циліндроконічний, прямокутний;
- за місцем подачі робочого розчину форсунками: зверху, знизу, збоку, існують зі змішаним типом;
- за видом зріджувального агенту: на димових чи інертних газах, на повітрі, на водяній парі.

Суттєву роль на інтенсивність масообмінних процесів при грануляції рідких систем в апараті із псевдозрідженим шаром відіграє гідродинамічний режим. У наведених вище грануляторах реалізується барботажний, рисунок 1.8 (а, б) та фонтануючий, рисунок 1.8 (в – е) режими гідродинамі,

- а) апарат ПШ із боковою подачею робочого розчину; б) апарат ПШ із подачею робочого розчину зверху; в) апарат із фонтануючим шаром та підведенням

робочого розчину збоку; г) апарат із фонтануючим шаром та підведенням робочого розчину знизу; г) апарат ПШ із підведенням робочого розчину і теплоносія збоку; д) апарат ПШ з інертним теплоносієм; е) апарат ПШ із внутрішньою сепарацією.

Рисунок 1.8 – Схеми основних типів апаратів із псевдозрідженим шаром [9]

Такий спосіб реалізації процесу не забезпечує циркуляційне перемішування матеріалу, що спричиняє ризик утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП. Тому найбільш доцільно застосовувати апарати, що працюють в неоднорідному режимі псевдозрідження.

1.5 Грануляція в неоднорідному псевдозрідженому шарі

1.5.1 Конструкції грануляторів з псевдозрідженим шаром

Авторами [16] запропонована конструкція апарату для гранулювання сульфату амонія в псевдозрідженому шарі, рисунок 1.9.

1 – камера гранулятора; 2 – диспергатор; 3 – газорозподільний пристрій; 4 – валки циліндричної форми; 5 – шиббер; 6, 7, 8 – сепаратори фракцій.

Рисунок 1.9 – Секція апарату псевдозрідженого шару [16]

Щоб забезпечити стійкість кінетики процесу при грануляції добрив із заданими властивостями та відповідної якості у грануляторі із псевдозрідженим шаром необхідною умовою є дотримання балансової задачі між продуктом, що вивантажується у якості готової продукції та новими центрами грануляції. Таким чином, кількість частинок в камері апарату з заданим діаметром повинна бути сталою.

Тому ця задача вирішується компенсацією зменшення кількості частинок за рахунок використання збоку апарата подрібнювача селективної дії. Це допоможе підтримувати заданий дисперсний склад шару матеріалу в грануляторі.

Недоліком цієї конструкції є: мала ефективність проведення процесу грануляції через відсутність циркуляції матеріалу через технологічні зони гранулятора, оплавлення гранул при використанні високотемпературного зріджувального агента (утворення малорухливих ділянок на поверхні ГРП), агломерація матеріалу.

Китайська компанія Daming pharmaceutical equipment [17] розробляє безліч грануляторів з псевдозрідженим шаром одні з яких FL Fluid Bed наведено на рисунку 1.10 та Factory Cheap Fluid Bed Granulator, рисунок 1.11.

Рисунок 1.10 – Гранулятор псевдозрідженого шару FL Fluid Bed [17]

Наведена конструкція, рисунок 1.10, використовується у фармацевтичній, харчовій, хімічній та аграрній промисловостях.

Зернистий матеріал подається до камери апарату з одночасним введенням рідкої гетерогенної фази за рахунок форсунок. Гарячий зріджувальний агент випаровує рідину з поверхні матеріалу і відводить її з системи. Цим самим відбувається нашарування компонентів розчину на початкові центри грануляції.

До переваг даної конструкції можна віднести наступні: проведення декількох процесів (грануляція та сушка) в одному апараті, зменшення кількості утвореної пилової фракції внаслідок стирання гранул одне об одну, безпечна експлуатація через спеціальні конструктивні рішення на випадок появи небезпеки.

Недоліком цього апарату є: агломерація частинок через брак перемішування.

Рисунок 1.11 – Установка з гранулятором псевдозрідженого шару Factory Cheap Fluid Bed Granulator компанії Daming pharm. equipment [17]

Дана установка, рисунок 1.11, складається з повітряного фільтра, високошвидкісного вентилятора, циклона, гранулятора із псевдозрідженим шаром.

Установка працює при пониженому тиску. Чисте повітря, нагріте до температури 130-170 °C (в залежності від сировини), через ГРП клапанного типу подається до камери гранулятора, що спричиняє рух зернистого матеріалу. Рідина, яка надходить через живильник розподіляється на поверхні гранул, випаровується та покидає апарат з теплоносієм.

Перевагами цієї конструкції є: робота при менших температурах теплоносія за рахунок низького тиску.

Недоліки: неможливість контролю за фракційним складом, недостатнє оновлення поверхні гранул, як наслідок агломерація.

Для усунення вище вказаних негативних результатів необхідною умовою є забезпечення об'ємної циркуляції в шарі матеріалу, що призведе до збільшення поверхні контакту фаз.

Саме для цього відомі світові компанії Glatt, GEA розробляють конструкції грануляторів із псевдозрідженим шаром прямокутної форми, що забезпечують поставлені вимоги:

- багатостадійність процесу в одному апараті;
- забезпечення оновлення поверхні матеріалу за рахунок 3D перемішування;

Розглянувши гранулятори із псевдозрідженим шаром, можна зробити висновки, що для дотримання стійкої кінетики процесу грануляції слід застосовувати апарати з неоднорідним струменево-пульсаційним псевдозрідженням в автоколивальному режимі. Це забезпечить виконання поставлених умов до гідродинаміки процесу.

1.6 Математичне моделювання взаємодії газових потоків з твердими частинками при неоднорідному псевдозрідженні

Розроблення математичних моделей для оптимального керування процесами при роботі з дисперсними системами потребує великих зусиль та знань в даній галузі, що пояснюється їх актуальністю.

Авторами [21] запропоновано для розгляду декілька підходів до опису взаємодії твердої та газової фаз:

- модель Ейлера-Ейлера (дворідинна модель);
- модель Ейлера-Лагранжа (MP-PIC);
- дискретна модель Ейлера-Лагранжа (DEM).

Модель Ейлера-Ейлера розглядає тверду та газову фазу як взаємопроникні на основі теорії потоку Річмана-Дженкінса. При такому підході обидві фази займають певний об'єм, який зведений до об'ємної частки [21].

Рівняння нерозривності, що враховує об'ємні частки обох фаз:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) = 0 \quad (1.1)$$

де α_i - об'ємна частка i -тої фази ($i=1$ – газова фаза, $i=2$ – тверда фаза); ρ_i - густина i -тої фази, кг/м³; \mathbf{u}_i - вектор швидкості i -тої фази, м/с; ∇ - оператор Гамільтона; τ - час, с.

На основі рівняння збереження імпульсу та перебігу масообмінних процесів між твердою та газовою фазою, запишемо рівняння сил, які залежать від підйімальної сили та тертя [21]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) \cdot \mathbf{u}_i = & -\alpha_i \nabla p_i + \nabla \cdot \bar{\bar{\bar{\tau}}}_i + \alpha_i \rho_i g + \sum_{j=1}^2 \left[R_{ji} + \dot{m}_{ji} \mathbf{u}_{ji} - \dot{m}_{ij} \mathbf{u}_{ij} \right] + \\ & \sum_{j=1}^2 \left[R_{ji} + \dot{m}_{ji} \mathbf{u}_{ji} - \dot{m}_{ij} \mathbf{u}_{ij} \right] + \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_{\text{lift},i} + \mathbf{F}_{\text{vm},i} \end{aligned} \quad (1.2)$$

де \dot{m}_{ji} - характеристика швидкості передачі маси від фази j до фази i , кг/(с · м³); \mathbf{u}_{ji} - вектор швидкості на поверхні контакту фаз, м/с; p – тиск, Па; g - прискорення вільного падіння, м/с²; \mathbf{F}_i - вектор масової сили на зовні, Па/м; $\mathbf{F}_{\text{lift},i}$ - вектор підйімальної сили, Па/м; $\mathbf{F}_{\text{vm},i}$ - вектор приєднаної масової сили, Па/м; $\bar{\bar{\bar{\tau}}}$ - тензор напруги розтягу-стиску, Па.

Дана модель неадекватно описує взаємодію частинок з газовою фазою та між самими частинками в цілому.

Розглянемо модель Ейлера-Лагранжа (стохастична модель). Тверда і газова фази умовно розглядають як два потоки рідини, з якої виділяють елементарний об'єм та проводять відносно нього розрахунки [21].

Стохастична модель описує як тверду так і газову фази за допомогою рівняння збереження імпульсу та нерозривності потоку:

Рівняння нерозривності потоку для i -тої фази [21]:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) = 0 \quad (1.3)$$

Рівняння збереження імпульсів для i -тої фази [21]:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i) = -\nabla p - \mathbf{F} + \alpha_i \rho_i \mathbf{g} \quad (1.4)$$

Ця модель є неприйнятною для твердої фази, але підходить для опису так званої емульсії утвореної двома потоками. Також вона адекватно описує газотвердий потік в апаратах із малими розмірами, коли теплові флуктуації газової фази впливають на рух великих частинок.

Рівняння нерозривності [21]:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) = 0 \quad (1.5)$$

Рівняння імпульсів [21]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_i \bar{\bar{\tau}}_i) + \alpha_i \rho_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_{DEM} \quad (1.6)$$

де \mathbf{F}_{DEM} - сила зчеплення між частинками, H .

До переваг моделі Ейлера-Лагранжа можна віднести те, що вона розглядає газові бульбашки як дискретні частинки, що зіштовхуються через хаотичний рух, зливаються та зростають.

З допомогою програмного середовища Ansys Fluent автори [21] показали відмінність вище розглянутих математичних моделей для опису неоднорідного псевдозрідження, провівши їх порівняння за результатами експериментальних досліджень та даних, отриманих при масових витратах теплоносія 0,005 кг/с. В

результаті було отримано графічні дані розвитку газової бульбашки в динаміці, рисунок 1.21.

Недоліком є те, що дослідження проводилися без подачі рідкої фази при за нормальних умов. Тому необхідно повторити експериментальні дослідження за реальних умов грануляції, унеможливаючи утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП при застосуванні високо температурного теплоносія.

Отже, виконавши огляд існуючих математичних моделей, що описують гідродинамічний режим неоднорідного псевдозрідження, встановлено, що найбільш адекватною є дискретна модель Ейлера-Лагранжа (DEM). Дана модель найбільш доцільно описує рух частинок та зріджувального агента із супроводженням фазових переходів.

Рисунок 1.21 - Динаміка розвитку газової бульбашки в часі при масових витратах зріджуючого агента 0,005 кг/с [21]

1.7 Висновки

Виконавши літературний огляд, можна зробити висновки що:

1. Раціональне землекористування з використанням інноваційних гуміново-мінеральних добрив нового покоління дозволять зменшити ризик виснаження ґрунтового покриву та забезпечать його відтворюваність;
2. Найбільш доцільним способом для створення гуміново-мінеральних добрив із заданими властивостями є використання техніки псевдозрідження;
3. Для одержання гранульованих гумінових добрив з пошаровою структурою, необхідною умовою є стійкість кінетики процесу грануляції та інтенсифікація дифузійно-контрольованих процесів при масовій кристалізації з рідких гетерогенних розчинів, шляхом застосування конфігурації ГРП з двоканально-асиметричним введенням газової фази, що спричиняє направлену тривимірну циркуляцію зернистого матеріалу в камері гранулятора, усуваючи ризик оплавлення матеріалу на робочій поверхні ГРП;

4. Переглянуто математичні моделі, що описують гідродинаміку неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження;
5. За результатами огляду літератури було сформульовано мету та задачі дослідження.

1.8 Мета та задачі дослідження

Метою роботи є встановлення закономірностей процесу неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі при підвищених висотах шару зернистого матеріалу та розроблення методики розрахунку промислових апаратів.

Для досягнення мети магістерської дисертації потрібно виконати наступні задачі:

- Обґрунтувати фізичну модель взаємодії газу із зернистим матеріалом при реалізації пульсаційного псевдозрідження;
- Скласти математичну модель взаємодії газового струменя з твердими частинками при неоднорідному псевдозрідженні;
- Встановити параметри струменево-пульсаційного псевдозрідження при мінімізації ризику утворення застійних зон на поверхні ГРП при 4-х кратному перевищенню висоти шару висоти пробою газового факела;
- Провести оцінку якості гідродинаміки пульсаційного режиму псевдозрідження;
- Перевірити адекватність фізичної та математичної моделей у автоколивальному режимі при неоднорідному псевдозрідженні;
- Експериментально визначити вплив висоти шару зернистого матеріалу на частоту пульсацій та індекс перемішування.

2 МОДЕЛЮВАННЯ НЕОДНОРІДНОГО СТРУМЕНЕВО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ В АВТОКОЛИВАЛЬНОМУ РЕЖИМІ

2.1 Фізична модель процесу грануляції гуміново-мінеральних добрив з рідких гетерогенних систем у апараті із псевдозрідженим шаром

Процес зневоднення та грануляції відноситься до складних тепломасообмінних процесів та складається з декількох стадій:

- псевдозрідження частинок в потоці високотемпературного теплоносія;
- розподілення робочого розчину по всій поверхні частинок;
- випаровування вологи з поверхні гранул та виведення її із системи;
- утворення мікрокристалічних шарів на поверхні гранул, що спричиняє їх ріст;
- утворення пилу внаслідок стирання гранул одна об одну та видалення його з апарату зі зріджувальним агентом.

Основними вимогами до гранульованого продукту є:

- рівномірність розподілення мінеральних, органічних компонентів та стимулюючих гумінових речовин по всьому об'ємі;
- сфероподібна форма;
- міцність більше 10 Н на гранулу;
- заданий дисперсний склад.

Поставлені вимоги можливо забезпечити при пошаровому механізмі грануляції в апараті із псевдозрідженим шаром.

Процес утворення гранульованого продукту пошарової структури зображена на рисунку 2.1 [22].

При зневодненні рідких гетерогенних систем стійкість кінетики процесу грануляції гуміново-мінеральних добрив суттєво залежить від гідродинамічного режиму псевдозрідження.

На стадії 0, рисунок 2.1, відбувається завантаження початкових центрів грануляції із еквівалентним діаметром D_{e0} . При підведенні нагрітого теплоносія із температурою на вході $T_{вх}$ із швидкістю $w_{г}$, що перевищує критичну $w_{кр}$ гранули прогріваються до температури шару $T_{ш} = 90...96\text{ }^{\circ}\text{C}$.

0 – стадія завантаження шару до апарату; 1 – стадія нанесення рідкої гетерогенної фази на поверхню твердих частинок при підведенні теплового агента; 2, 3 – стадія видалення вологи та кристалізації з утворенням мікрошару на поверхні частинки; 4 – стадія вивантаження гранульованого продукту

Рисунок 2.1 – Механізм утворення гуміново-мінеральних добрив пошарової структури [22]

На стадії 1 відбувається введення рідкої гетерогенної фази із заданим складом. За рахунок адгезійно-сорбційних сил на поверхні гранули утворюється тонка плівка рідини. Щоб запобігти перезволоженню гранул, що призведе до утворення агломерату, необхідно мінімізувати час їхнього перебування у зоні зрошення. Тому зволожені частинки необхідно розподілити між сухими за рахунок об'ємного перемішування з інтенсивним оновленням поверхні контакту фаз.

На стадії 2 до змоченої гранули підводиться теплота разом із теплоносієм, як конвективно $Q_{конв}$ (від теплового агента) так і кондуктивно $Q_{конд}$ (від нагрітої гранули). Наявність різниці парціальних тисків парів вологи у зріджувальному газовому агенті та над поверхнею гранул забезпечує видалення вологи та її винесення із системи разом із теплоносієм. При цьому відбувається масова кристалізація, що характеризується утворенням шару мікрокристалів з органічних, мінеральних та гумінових частинок (стадія 3), спричиняючи збільшення лінійних розмірів гранули до D_{e1} .

У подальшому відбувається повторне циклічне проходження стадій 1–3 в апараті за час Δt і, як наслідок, зростає еквівалентний діаметр частинок шару до заданого кінцевого $D_{ек}$, який розраховується за формулою [22]:

$$D_{ек} = D_{el} + \lambda \Delta t, \quad (2.1)$$

де $\lambda_{сер}$ – середня лінійна швидкість росту гранул, що визначається з масових витрат сухих речовин, які надходять до гранулятора із робочим розчином за час Δt , мм/год.

Гранули, які на стадії 4 досягли заданого еквівалентного діаметру вивантажуються з апарату у вигляді гранульованого продукту.

Наведений пошаровий механізм грануляції гуміново-мінеральних добрив можливо реалізувати в апараті із псевдозрідженим шаром.

Для цього в камері гранулятора при підведенні зріджувального агенту необхідно забезпечити циклічне проходження гранулами через відповідні технологічні зони: 1 – інтенсивного тепломасообміну, 2 – зрошення, 3 – висхідну та 4 – зону релаксації, рисунок 2.2.

Зона інтенсивного тепломасообміну (1), рисунок 2.2, характеризується передачею імпульсу від високотемпературного теплоносія з температурою $T_{вх}$ частинкам, що спричиняє випаровування вологи. Потім матеріал переміщується зоною висхідного потоку (3), до зони зрошення (2), де відбувається нанесення гетерогенного розчину на поверхню гранул із наступним утворенням на ній мікрошарів поживних речовин. Частинки, на яких утворився мікрошар після видалення розчинника, переміщується до низхідної зони 4 (зони релаксації), де подальше видалення вологи відбувається у фільтраційному режимі при протитечії.

Зернистий матеріал із зони 4 переміщається до зони 1 і цикл повторюється багатократно до досягнення заданого розміру гранульованого продукту.

1 – зона інтенсивного тепломасообміну; 2 – зона зрошення; 3 – зона висхідного потоку; 4 – зона релаксації.

Рисунок 2.2 - Фізична модель процесу грануляції в апараті із псевдозрідженим шаром

Лімітуючою стадією грануляції є масова кристалізація, тому висота нерухомого шару зернистого матеріалу визначається з умов масообміну для забезпечення стійкої кінетики процесу.

Попередніми експериментами встановлено, що висота шару зернистого матеріалу $H_{\text{заг}}$ в п'ять разів перевищує висоту пробою газового факела $z_{\text{ф}}$ – $z_{\text{ф}}/H_{\text{заг}}=0,2$.

Висота нерухомого шару зернистого матеріалу, одержана з умов масообміну при стійкій кінетиці процесу грануляції, м:

$$H_0 = \frac{\Sigma F_{\text{ш}} \cdot d_e}{6F_a \cdot (1 - \varepsilon_0)} \quad (2.2)$$

$$\Sigma F_{\text{ш}} = \frac{M_{\text{вол}}}{\beta \cdot \Delta P^-}, \quad (2.3)$$

де $\Sigma F_{\text{ш}}$ – сумарна поверхня частинок у шарі, м^2 ; d_e – еквівалентний діаметр частинок, м; F_a – площа поперечного перерізу апарату, м^2 ; $\varepsilon_0=0,4$ – початкова порозність в камері гранулятора (порозність нерухомого, щільно упакованого шару зернистого матеріалу).

Тоді висота нерухомого шару зернистого матеріалу визначатиметься, м:

$$H_0 = \frac{M_{\text{вол}} \cdot d_e}{\beta \cdot \Delta P^- \cdot 6 \cdot F_a \cdot (1 - \varepsilon_0)}, \quad (2.4)$$

де $M_{\text{вол}}$ – масові витрати випареної вологи, кг/с ; ΔP^- – рушійна сила по масообміну ($\Delta P^- = P_n - P'_n$).

Таким чином, реалізація розробленої фізичної моделі процесу грануляції сприятиме інтенсифікації масообмінних процесів, та забезпечить збільшення ефективності процесу в цілому.

Реалізація такої фізичної моделі процесу грануляції суттєво залежить від гідродинамічних умов взаємодії газової та твердої фаз і визначається конструкцією газорозподільного пристрою (ГРП) та камери гранулятора.

2.2 Фізична модель неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі

2.2.1 Вимоги до гідродинаміки неоднорідного псевдозрідження

Для забезпечення пошарового механізму грануляції відповідно до фізичної моделі, необхідно забезпечити виконання наступних вимог до гідродинаміки псевдозрідженого шару:

- інтенсивна циркуляція в об'ємі шару з винесенням за межі початкового шару (H_0) не менше 30% маси зернистого матеріалу з частотою не менше 1 Гц;
- мінімізація та усунення застійних зон на робочій поверхні ГРП;
- підвищення інтенсивності дифузійно-контрольованих процесів при наявності фазового переходу.

2.2.2 Неоднорідне струменево-пульсаційне псевдозрідження в автоколивальному режимі

Фізична модель неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі, рисунок 2.3, полягає в тому, що до камери гранулятора, зріджувальний агент вводиться дворівнево асиметрично в горизонтальному та вертикальному напрямках через щілини ГРП, які проектуються в точках p і k та умовно ділять камеру апарата на 3 зони, рівними по ширині.

По лінії точки k відбувається злиття двох струменів, що призводить до утворення об'єднаного газового факела із висотою пробою z_ϕ . У зв'язку з тим, що $z_\phi < H_0$ на його вершині починає формуватися газова бульбашка (за умови, що швидкість підведення газу w_r значно перевищує швидкість фільтрації $w_r > w_\phi$). Після досягнення критичного розміру бульбашка починає прискорений вертикальний рух та спричиняє інерційний викид значної маси матеріалу в надшаровий простір.

При взаємодії з направляючим розподільником тверді частинки переміщуються на поверхню зони I . Якщо $H_{зал} > z_\phi + \Delta$ утворюється наступна бульбашка, якщо навпаки реалізується фонтануючий режим і перенесений матеріал прискорено повертаються до утворених пустот у зонах II та III до початкового рівноважного стану – цикл повторюється багатократно.

До того ж, процес зворотного руху зернистого матеріалу при заповненні пустот у камері апарата відбувається протитечійний рух зернистого матеріалу з теплоносієм, що значно підвищує рушійну силу масообміну. Окрім того, у зоні *I* рух газового теплоносія відбувається виключно у фільтраційному режимі.

Реалізація такої моделі взаємодії газового середовища та зернистого матеріалу можлива при застосуванні спеціальної конструкції ГРП [22].

Автоколивальний неоднорідний струменево-пульсаційний режим псевдозрідження умовно поділяють на декілька стадій:

1 – утворення газової бульбашки, що займає 1/3 від ширини камери гранулятора в зонах *II* та *III* – τ_1 ;

2 – інерційний викид зернистого матеріалу із зон *II* і *III* в надшаровий простір та перенаправлення його до зони релаксації *I* – τ_2 ;

3 – інтенсивне переміщення зернистого матеріалу із зони *I* до утворених пустот у зонах *II* та *III* із поверненням шару до стану рівноваги – τ_3 .

а) стан рівноваги;

б) утворення першої
бульбашки;

в) підйом першої
бульбашки;

г) підйом другої
бульбашки;

д) зсув шару гранул;

е) повернення до стану
рівноваги.

Рисунок 2.3. – Модель взаємодії газової та твердої фаз у апараті при неоднорідному псевдозрідженні в автоколивальному режимі за підвищених висот шару зернистого матеріалу

Загальна тривалість циклу, с:

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3. \quad (2.5)$$

Отже, запропонована фізична модель дозволяє реалізувати тривимірне перемішування гранул в апараті з проходженням через технологічні зони, забезпечуючи активне оновлення поверхні контакту фаз.

Необхідно провести перевірку адекватності фізичної моделі та конструкцію ГРП експериментально при збільшених висотах шару зернистого матеріалу.

Таким чином реалізується неоднорідне струменево-пульсаційне псевдозрідження в автоколивальному режимі без застосування зовнішніх механічних пульсаторів.

2.3 Математична модель гідродинаміки неоднорідного псевдозрідження

Відповідно до фізичної моделі, сформульовано наступні припущення для впровадження математичної моделі:

- камера гранулятора має форму паралелепіпеда із співвідношенням розмірів камери гранулятора в горизонтальній площині $A:B=3:1$;
- робоча камера апарату умовно розділена на 3 ріні по ширині зони;
- в апараті знаходиться зернистий шар з початковою висотою H_0 ;
- швидкість теплоносія достатня для переміщення матеріалу із зон *II* та *III* у надшаровий простір, а потім до зони *I*;
- енергія, яка надходить до камери гранулятора з зріджувальним агентом витрачається на подолання сил тертя між твердою та газовою фазою, на надання імпульсу для руху частинок та на подолання гідростатичного опору;
- в *I* зоні порозність є сталою $\varepsilon_I = 0,4$. Порозність по зонам *II* та *III* коливається в межах $0,5 \leq \varepsilon_{II,III} \leq 0,85$

Тому для опису неоднорідного псевдозрідження було обрано математичну модель, структура формули якої запропонована Гідасповим [23]. Загальний гідравлічний опір, що витрачається на надання імпульсу системі, подолання сил тертя твердої і газової фаз та гідростатичної складової, рівняння 2.6.

$$\Delta P_{\text{загальний}}(\tau) = \Delta P_{\text{імпульсу}}(\tau) + \Delta P_{\text{тертя}}(\tau) + \Delta P_{\text{гідрост.}}(\tau) \quad (2.6)$$

Так як в зонах *II* та *III* утворюється газова бульбашка, це сприяє інтенсивному перемішуванню матеріалу. Рівняння для визначення складових на які витрачається тиск при перемішуванні маси із зон *II* та *III* виражається із значень порозностей по даних зонах – $\varepsilon_{T(II;III)}$:

$$\Delta P_{\text{імпульсу}}(\tau) = \frac{1}{2} [\rho_{\text{т}} \varepsilon_{\text{т}(II;III)}(\tau) w_{\text{т}}(\tau)^2 + \rho_{\text{г}} \varepsilon_{\text{г}(II;III)}(\tau) w_{\text{г}}(\tau)^2], \quad (2.7)$$

де $\varepsilon_{\text{т}(II;III)}$, $\varepsilon_{\text{г}(II;III)}$ – порозність твердої та газової фаз у II та III зонах апарату;
 $w_{\text{т}}$, $w_{\text{г}}$ – миттєві значення швидкості твердих частинок та газу в камері гранулятора, м/с.

Значення миттєвих приведених швидкостей теплоносія визначають із відомої залежності [23], враховуючи динаміку зміни порозності в зонах II та III камери гранулятора:

$$\text{Re}(\tau) = \frac{\text{Ar} \varepsilon_{\text{г}(II;III)}(\tau)^{4,75}}{18 \cdot 0,61 \sqrt{\text{Ar} \varepsilon_{\text{г}(II;III)}(\tau)^{4,75}}}; \quad (2.8)$$

$$w_{\text{г}}(\tau) = \frac{\text{Re}(\tau) \nu}{d_{\text{е}}}. \quad (2.9)$$

Усереднена миттєва швидкість твердих частинок у перших двох стадіях циклу, м/с:

$$w_{\text{т}}(\tau_i) = \frac{d\varepsilon_{\text{г}(II;III)}}{d\tau} = \frac{\varepsilon_{\text{г}(II;III)}(\tau_{i-t}) - \varepsilon_{\text{г}(II;III)}(\tau_i)}{\tau_i - \tau_{i-t}}. \quad (2.10)$$

Опір для подолання сил тертя при русі газової фази і тертя між самими частинками проводився за виразом [23]:

$$\sum \Delta P_{\text{тертя}}(\tau) = \Delta P_{\text{т.г.}}(\tau) + \Delta P_{\text{т.т.}}(\tau); \quad (2.11)$$

$$\Delta P_{\text{т.г.}}(\tau) = 2f_{\text{г}} \varepsilon_{\text{г}(II;III)}(\tau) \rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H_0 \frac{1}{D_{\text{а(пр)}}}; \quad (2.12)$$

$$\Delta P_{\text{т.т.}}(\tau) = 5,7 \cdot 10^{-2} \frac{1}{D_{\text{а(пр)}}} \varepsilon_{\text{г}(II;III)}(\tau) \rho_{\text{г}} w_{\text{г(кр)}} \theta H_0 \sqrt{g D_{\text{а(п)}}}; \quad (2.13)$$

Гідравлічний опір в шарі визначався за виразом:

$$\Delta P_{\text{гідрост.}}(\tau) = g \int_0^{H_i} (\rho_{\text{т}} \varepsilon_{\text{т(заг.)}}(\tau) + \rho_{\text{г}} \varepsilon_{\text{г(заг.)}}(\tau)) dz, \quad (2.14)$$

де H_i – значення висоти шару в певний момент часу τ_i , м.

Визначимо гідростатичний тиск на $\tau_1 + \tau_2$ з урахуванням фізичної моделі:

$$\Delta P_{\text{max}} = \Delta P_{\text{гід.}(0)} + \Sigma \Delta P_6 = \rho_{\text{т}} (1 - \varepsilon_0') g (H_0 + \Delta H_0 + \Sigma d_{6(\text{max})}), \quad (2.15)$$

де $d\delta_{\max}$ – можливий максимальний діаметр бульбашки після відриву від вершини газового факела; $\Delta P_{\text{гид.}(0)}$ – гідростатичний опір нерухомого шару матеріалу, Па:

$$\Delta P_{\text{гидрост.}(0)} = \rho_{\text{т}}(1 - \varepsilon_0')g(H_0 + \Delta H_0) \quad (2.16)$$

Визначимо масу зернистого матеріалу, яка була винесена за межі фіксованого об'єму шару:

$$\Delta M_{(\max)} = \frac{(\Delta P_{\max} - \Delta P_{\text{гидрост.}(0)})F_a}{g} \cdot K_a, \quad (2.17)$$

де K_a – коефіцієнт, що враховує геометричну форму камери гранулятора в зоні ГРП; $F_a = A \cdot B$ – площа поперечного перерізу апарату з геометричними параметрами $A \times B \times H_0$, м²:

Таким чином, залишкова маса матеріалу в камері гранулятора буде розраховуватися за формулою, кг:

$$M_{\text{зал.}(\min)} = M_0 - \Delta M_{\text{виносу}(\max)}, \quad (2.18)$$

або:

$$M_{\text{зал.}}(\tau) = M_0 - \Delta M(\tau) = V_{\text{ш0}} \left(1 - \varepsilon_{\text{Г(заг.)}}(\tau) \right) \rho_{\text{т}} \quad (2.19)$$

Отже, гідростатичний тиск розраховуватиметься як, Па:

$$\Delta P_{\text{гидрост.}}(\tau) = \frac{M_{\text{зал.}}(\tau)g}{F_a \cdot K_a} \quad (2.20)$$

Для розв'язку моделі, враховуючи, що перемішування відбувається у II і III зонах, необхідно визначити динаміку зміни порозності в цих зонах.

2.4 Розрахунок діаметру газової бульбашки при необнорідному струменево-пульсаційному псевдозрідженні

Так як швидкість підведення теплоносія набагато перевищує швидкість фільтрації, на висоті $z_{\phi} + \Delta$ починає формуватися газова бульбашка, яка має суцільні стінки по площині z камери гранулятора, рисунок 2.4.

Згідно фізичної моделі, газова бульбашка повинна займати не більше $1/3$ об'єму шару, тобто $1/3V_{an}$.

Тож, враховуючи, що бульбашка циліндричної форми, рівновага сил, які на неї діють визначається як:

$$\Delta P_{\text{підйому}} = \Delta P_{\text{гідростатичний}}; \quad (2.21)$$

$$V_6 \rho_T (1 - \varepsilon_0) g = F_6 (H_0 - d_6 - z_{\phi} - \Delta) \rho_T (1 - \varepsilon_0) g, \quad (2.22)$$

або:

$$V_6 = F_6 (H_0 - d_6 - z_{\phi} - \Delta), \quad (2.21)$$

де $V_6 = \pi d_6^3 / 6$ – об’єм бульбашки, м³; $F_6 = \pi d_6^2 / 4$ – площа перерізу бульбашки, м².

Газова бульбашка, що утворилася має циліндричну форму з віссю симетрії по горизонталі та шириною циліндрі B , тобто:

$$V_6 = \frac{\pi d_6^2}{4} B; \quad F_6 = d_6 B, \quad (2.23)$$

де B – ширина камери гранулятора, м.

Звідси:

$$\frac{\pi d_6^2}{4} B = d_6 B (H_0 - d_6 - z_{\phi} - \Delta), \quad (2.24)$$

Тоді розрахунковий діаметр першої бульбашки, м:

$$d_{61} = \frac{H_0 - z_{\phi} - \Delta}{1 + \frac{\pi}{4}}, \quad (2.25)$$

або

$$d_{61} = 0,56 [H_0 - (z_{\phi} + \Delta)]. \quad (2.26)$$

При підвищених висотах шару зернистого матеріалу спостерігається утворення другої бульбашки в межах одного циклу за умови $z_{\phi} + \Delta \ll H_{\text{IIIзал}}$.

а) $z_{\phi} + \Delta \leq H_{\text{IIIзал}};$

б) $z_{\phi} + \Delta \ll H_{\text{IIIзал}}.$

Рисунок 2.4 – Схема для розрахунку діаметру газової бульбашки

Діаметр другої бульбашки розраховується за формулою, м:

$$d_{62} = \frac{H_{\text{IIIзал}} - z_{\phi} - \Delta}{1 + \frac{\pi}{4}}, \quad (2.27)$$

або

$$d_{62} = 0,56 [H_{\text{IIIзал}} - (z_{\phi} + \Delta)]. \quad (2.28)$$

де $H_{\text{IIIзал}}$ – залишкова висота матеріалу в об’ємі гранулятора.

Враховуючи відхилення розмірів бульбашки від циліндричності при проведенні реальних експериментів, пропонується розраховувати діаметр першої бульбашки із застосуванням поправочних коефіцієнтів (q та α):

$$d_{61,2} = q \cdot H_0 - \alpha \quad (2.29)$$

Залежність зміни діаметра газової бульбашки від висоти шару зернистого матеріалу наведено на рисунку 2.5.

Рисунок 2.5 – Залежність зміни діаметра газової бульбашки від висоти шару зернистого матеріалу

2.5 Оцінка якості неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі

Для реалізації процесу грануляції якість гідродинаміки оцінюється мінімальним значенням застійних зон на робочих поверхнях ГРП при використанні високотемпературного теплоносія, що перевищує температуру плавлення термолабільних компонентів за відношення висоти пробою газового факела $z_{\text{ф}}$ до висоти шару матеріалу H_0 , $z_{\text{ф}}/H_0 \leq 0,21$. Це дозволить уникнути оплавлення матеріалу.

Для цього запропоновано використовувати модифіковану функцію втрат якості професора Тагуті [24], що враховує: 1) відхилення порозності в зоні Д від заданої $\varepsilon_{\text{Д}}=0,85$; 2) відхилення довжини застійної зони δ від допустимої, яка дорівнює 1% від загальної довжини пластини ГРП. Схема для визначення втрат якості гідродинаміки за методом Тагуті наведено на рисунку 2.6.

Модифікована функція втрат якості за Тагуті має вигляд:

$$L = K_1(\varepsilon_3 - \varepsilon_{\text{Д}})^2 + K_2 \left[1 - \left(\frac{\delta - \delta_3}{l} \right) \right]^2, \quad (2.30)$$

де $K_1=0,3$ та $K_2=0,7$ – вагові коефіцієнти, що розраховуються; ε_3 – задане значення порозності шару в зоні ГРП; Δ – експериментально визначене поточне значення довжини малорухомої області шару на пластині ГРП.

Рисунок 2.6 – Схема до визначення якості гідродинамічного режиму

Враховуючи циклічний автоколивальний характер неоднорідного псевдозрідження індекс динамічної якості обраховується як відношення часу виконання умови якісної гідродинаміки до загального часу циклу:

$$i_{\text{я}} = \tau_{\text{я}}/\tau_{\text{ц}} \quad (2.31)$$

При виконанні умови $L_{\text{д}} \leq [L_{\text{д}}] = 0,1$ якість гідродинаміки вважається задовільною, рисунок 2.7.

Рисунок 2.7 – До визначення індекса динамічної якості

2.6 Методика проведення комплексних експериментальних досліджень

2.6.1 Методика визначення порозності шару в камері гранулятора

Метою експериментальних досліджень було визначення порозності шару в камері гранулятора та в зоні Д (на робочій поверхні ГРП) при неоднорідному псевдозрідженні.

Для визначення порозності в трьох зонах камери гранулятора при неоднорідному псевдозрідженні застосовувалась методика відеоаналізу з частотою 30 кадрів/с. При цьому об'єм пустот $V_{\text{п}}$ в об'ємі шару $V_{\text{ш}}$ з висотою H_0 по зонах визначався методом відеозйомки.

Точки відбору перепаду тиску в апараті $\Delta P_{\text{ш}}$ знаходились на висоті $H_0=320$ мм.

Дослідження проводились на установці, наведеній на рисунку 2.8.

1 – камера гранулятора; 2 – циклон; 3 – діафрагма; 4 – газодувка;

5, 6 – дифманометри; 7 – відеокамера

Рисунок 2.8 – Установка для дослідження гідродинаміки псевдозрідженого шару

Порозність шару визначається за результатами проведених експериментів:

$$\varepsilon_i = V_{II(i)} / V_{III(i)} \quad (2.32)$$

де $V_{III} = V_I + V_{II} + V_{III}$ – сумарний об'єм шару зернистого матеріалу, що знаходиться в апараті, м³.

Відповідно до цього процес вимірювання проводився, коли порозність в зоні Д задовольняла індексу якості $i_{я}$.

Одночасно з цим проводилось визначення зміни порозності в зоні Д за тією ж методикою.

Порозність шару в зоні Д (на робочих поверхнях ГРП) розраховується за формулою:

$$\varepsilon_D = V_{II(D)} / V_{III(D)} \quad (2.33)$$

де $V_{II(D)}$ – об'єм пустот в зоні Д, м³; $V_{III(D)}$ – об'єм зернистого матеріалу в зоні Д, м³.

2.6.2 Методика визначення індексу перемішування в шарі

Метою досліджень було визначення впливу об'ємних витрат зріджувального агенту на вході в камеру апарата та еквівалентного діаметру гранульованого матеріалу на індекс перемішування в шарі.

При проведенні експериментів використовувалася установка, наведена на рисунку 2.8.

Щоб розрахувати індекс перемішування шару необхідно визначити масу матеріалу, що залишається у фіксованому об'ємі, враховуючи динаміку зміни порозності в II та III зонах камери апарата.

За результатами проведених досліджень визначався індекс перемішування в фіксованому об'ємі шару:

$$j_{\Delta M} = (M_{III0} - M_{III(залиш)}) / M_{III0} = \Delta M_{III} / M_{III0}, \quad (2.34)$$

$$M_{III0} = V_{III0} \cdot \rho_m (1 - \varepsilon_0) \quad (2.35)$$

$$M_{III(залиш)} = V_{III0} \cdot \rho_m (1 - \varepsilon_{i(сер)}) \quad (2.36)$$

де ΔM_{III} – маса матеріалу, що була викинута у надшаровий простір, кг; M_{III0} – початкова маса матеріалу, кг; $M_{III(залиш)}$ – маса матеріалу, що залишилася в

фіксованому об'ємі шару, кг; $\varepsilon_{i(сер)}$ – середнє значення порозності по зонах гранулятора.

2.7 Аналіз та безпека обслуговування лінії виробництва гуміново-мінеральних добрив

Посилаючись на Закон України «Про охорону праці» на механізми, машини та обладнання доцільно впровадити нешкідливі умови їх експлуатації персоналом та розробити необхідні документації у вигляді сертифікатів для безпечного використання.

Темою дисертаційної роботи є: *«Гідродинаміка неоднорідного псевдозрідження»*. При роботі устаткування по виробництву гранульованих гуміново-мінеральних добрив виникають небезпечні фактори, які загрожують здоров'ю та життю людини. Тому необхідною вимогою є відповідність цих факторів встановленим державним стандартам, санітарним нормам та правилам.

Безпечна робота персоналу на установці потребує знання правил безпеки для підприємств з виробництва даного типу продукції, знання конструкційних особливостей устаткування та принципів роботи.

Керування параметрами технологічного процесу виготовлення гуміново-мінеральних добрив відбувається за участі оператора лінії, пульт управління якого розташований у виробничому приміщенні з загальною площею $S = 120 \text{ м}^2$ та об'ємом $V = 480 \text{ м}^3$.

Під час обслуговування лінії виготовлення гуміново-мінеральних добрив можуть виникнути наступні шкідливі та небезпечні виробничі фактори:

- ураження електричним струмом;
- повітря робочої зони та устаткування, що має надмірну температуру окремих елементів;
- вібрація та виробничий шум;
- рухомі та обертові частини;
- пожежонебезпека.

2.7.1 Захист при електронебезпеці

Лінія виробництва, яка розробляється в дисертаційній роботі розташовується у сухому приміщенні з температурою та вологовмістом повітря, що задовольняє гігієнічно-санітарні норми. Підлога приміщення залізобетонна. Згідно ПУЕ-86 воно відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою. Пульт керування машиніста має напругу $U = 220/380$ В та частотою $f = 50$ Гц. Мережа з глухозаземленою нейтраллю.

Заходами щодо електробезпеки є:

1) Застосування ізоляції на устаткуванні, що проводить струм з опором в межах $R \geq 0,5$ Ом.

2) Недоступність елементів установки, що знаходяться під напругою.

3) Електророзділення мережі за допомогою спеціальних розділяючих трансформаторів.

4) Занулення в електроустановках з напругою до $U = 1000$ В являє собою умисне з'єднання частин електроустаткування, що не знаходяться під напругою, з глухозаземленою нейтраллю генератора або трансформатора в мережі трифазного току, з глухозаземленим виведенням джерела однофазного або ж постійного току, рисунок 2.10.

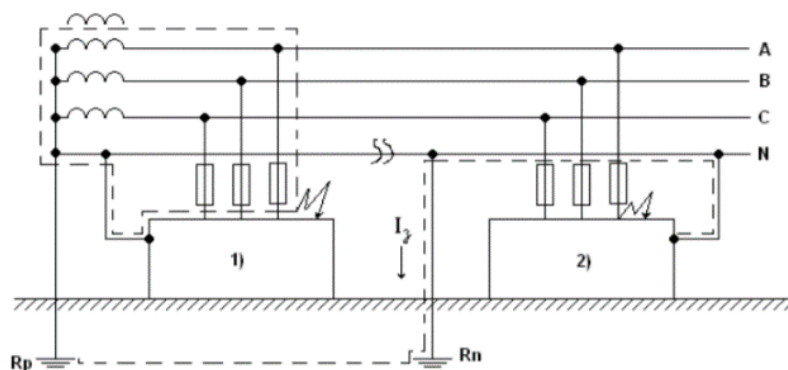


Рисунок 2.10 – Схема занулення електрообладнання

Сила струму короткого замикання при пробії на корпус в мережі з глухозаземленою нейтраллю, А:

$$I_{кз} = U_{\phi} / (r_0 + z), \quad (2.50)$$

де U_{ϕ} – напруга в мережі, В;

r_0 – внутрішній опір, Ом;

z – опір провідника, Ом.

Процес занулення відбувається наступним чином: занулюючі провідники повинні вибиратися так, щоб під час замикання на корпус або на нульовий захисний провід виникали струми короткого замикання, що перевищує не менше, ніж в 3 рази номінальний струм плавкого елемента найближчого запобіжника, або нерегулюючого розчіплювача, або уставку струму регулюючого розчіплювача автоматичного вимикача із зворотною залежною від струму характеристикою. За відсутності технічних даних на автоматичних вимикачах з номінальним струмом до 100 А коефіцієнт запасу струму миттєвого спрацювання повинен знаходитися в межах 1,25 – 1,4. Також сумарна провідність нульового провідника для всіх випадків повинна бути >50% провідності фазового провідника.

5) Автоматичне відключення устаткування у разі виникнення проблем, а також наявність захисного занулення.

6) Ізоляція електричних мереж від землі.

Ізоляція електричного устаткування- це шар діелектричного матеріалу, або ж конструкція створена з діелектрика.

7) Вирівнювання потенціалів (напруг).

8) Використання засобів орієнтації в електричному устаткуванні, що надасть змогу робітникам забезпечити безпомилкове виконання дій та орієнтування при виконанні робіт.

Для кращої орієнтації проводиться спеціальне маркування на виробничому обладнанні (у вигляді цифрових, символічних та буквенно-смыслових умовних позначеннях), попереджувальними сигналами, написами і табличками, застережливим знаком «Обережно! Електрична напруга», відповідним розташуванням і забарвленням неізольованих струмопровідних частин та світловою сигналізацією.

9) Розташування рубильників включення в шафах спеціального призначення.

10) Встановлення механічних або електромагнітних блокувальних пристроїв (на устаткуванні з напругою до 1000 В).

11) Під час роботи з електроустаткуванням потрібно застосовувати індивідуальні захисні засоби (діелектричні килимки, рукавички та взуття).

12) У невеликих приміщеннях застосовувати малі напруги (≥ 42 В).

Джерелом малої напруги можуть слугувати гальванічні елементи типу батарей, акумулятори і. т. д.

Категорично заборонено:

- лишати виробничу лінію без нагляду;
- виконувати ремонтні роботи лінії без відключення електромережі;
- виконувати роботу на вузлах виробничої лінії, які не занулені;
- допускати до виконання роботи персонал, який не пройшов навчання та не був ознайомлений з правилами техніки безпеки.

2.7.2 Повітря робочої зони

Холодний період року характеризується оптимальною 20–23°C та фактичною 19-21 °C температурами у робочому приміщенні, а теплий: 23-25 °C та 22-24°C. Відносна вологість повітря становить 50%, при швидкості руху, що не перевищує – 0,2 м/с.

Мікрокліматичні параметри, які відповідають нормам забезпечуються такими заходами:

1. Робочі приміщення опалюються за допомогою радіаторів, батарей, які мають температуру $50 \div 60^\circ\text{C}$;
2. Швидкість повітря та його вологовміст забезпечується штучною вентиляцією.

В повітрі робочої зони знаходяться пари розчинів гуміново-мінеральних компонентів та пил, що утворився при стиранні ганул, показники ГДК якого знаходяться у допустимих нормах (1,1-3,05 мг/м³). Але з розрахунку техніки

безпеки на виробництві в якості штучної вентиляції місцевого типу використовується витяжний зонт.

Ефективність роботи витяжного зонта забезпечується максимально, якщо:

- об'єм течії повітря, що до нього поступає менше об'єму відібраного повітря;
- розміри вхідного отвору зонта більше розмірів джерела.

Надійність роботи зонта забезпечується мінімізацією відстані між вертикальним шляхом кромки та верхньою кромкою відведення шкідливих речовин.

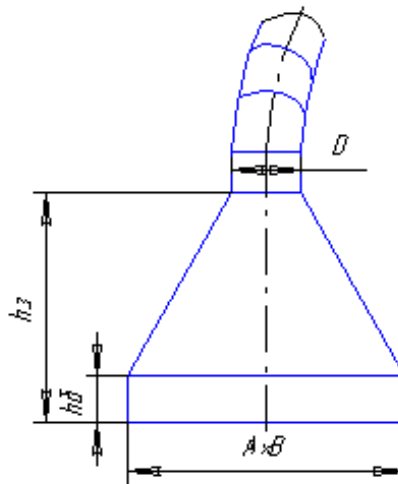


Рисунок 2.11– Схема витяжного зонта

Проведемо перерахунок параметрів зонта.

Розраховуємо габаритні розміри:

- 1) H - висота на якій підвішують зонт задається в межах $1,6 \div 1,8$ м. Тому обираємо $H = 1,7$ м.
- 2) параметри прямокутного зонта:

$$A = a + 0,8h = 0,4 + 0,8 \cdot 1 = 1,2 \text{ м},$$

$$B = b + 0,8h = 0,4 + 0,8 \cdot 1 = 1,2 \text{ м},$$

де $a = b = 0,4$ – поверхні, які перекриваються, м; $h = 1$ – відстань від пазу зонта до поверхні, що перекриваються, м.

- 3) Тоді сумарна висота зонта:

$$h_3 = \frac{A-D}{2tg \frac{\varphi}{2}} + h_6 = \frac{1,2-0,3}{2tg \frac{60}{2}} + 0,2 = 0,97\text{м}$$

де $D = 0,3$ м – діаметр труби; $h_6 = 0,2$ м – висота бортової частини, що зображений на рисунку 2.11;

Висота зонти приймається $h_3 = 1$ м.

Об'єм повітря, що відводиться за межі робочого приміщення через витяжну трубу, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$J_3 = 3600 F V_0 = 3600 \cdot 1,44 \cdot 0,5 = 2592 \text{м}^3/\text{год}$$

де $V_0 = 0,5$ м/с – середня швидкість в зонту по перерізу;

F – площа перерізу пристрою, м^2 :

$$F = AB = 1,2 \cdot 1,2 = 1,44 \text{м}^2,$$

Втрати тиску у системі вентиляції $\Delta P = 55$ Па.

Обираємо прямокутний канальний вентилятор із загнутими вперед лопатями серії SVF 50-30/25-4D: з продуктивністю $J_v = 2570$ $\text{м}^3/\text{год}$; максимальний тиск, що створює обладнання $P_v = 381$ Па; частота обертання колеса $n = 1380$ об/хв, ККД $\eta = 0,64$.

Проводимо підбір електродвигуна.

Необхідна потужність на валу електродвигуна знаходиться за формулою:

$$N = \frac{J_v P_v}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_v \eta_n} = \frac{2570 \cdot 381}{3600 \cdot 102 \cdot 0,64 \cdot 0,7} = 6 \text{ кВт},$$

де $J_v = 2570$ $\text{м}^3/\text{год}$ – продуктивність вентилятора;

$P_v = 381$ Па – тиск, що створює вентилятор;

$\eta_v = 0,64$ – ККД вентилятора;

$\eta_n = 0,7$ – ККД передачі.

Потужність електромотора розраховують із коефіцієнтом запасу 1,5.

Для промислового вентилятора обираємо трифазний асинхронний електродвигун типу АІР 132 S4 потужністю $N = 7,5$ кВт та частотою обертання валу $n = 1450$ об/хв.

Для відведення пилу над бункером фасовки готової продукції встановлюється витяжний зонт. Таким чином, завдяки системі вентиляції

концентрація пилу в повітрі робочої зони не перевищує ГДК, що відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 становить 2 мг/м^3 . Також під час роботи лінії установки по виробництву гранульованих гуміново-мінеральних добрив виникає небезпека, пов'язана з можливістю травмування персоналу високотемпературними частинами обладнання.

Для запобігання випадку опіків персоналу поверхня частин камери гранулятора, яка нагрівається близько 180°C покривається кожухом, який виготовлено із термоізоляційного матеріалу, що унеможливорює термічні травми. Температура поверхні кожуха 45°C , $q=250 \text{ Вт/м}^2$, що задовольняє санітарні норми.

2.7.3 Захист персоналу від шуму та вібрації

Під час виробництва гуміново-мінеральних добрив внаслідок роботи електродвигуна з потужністю 6 кВт, рухомих частин установки, витяжного зонта, створюється шум в діапазоні 97-101 дБА та вібрації.

В відповідності до ГОСТ 12.1.003-83 захист від шуму та вібрації необхідно досягати за рахунок шумобезпечного обладнання, використовуючи засоби колективного та індивідуального захисту. Головним колективним засобом захисту є зниження шуму в його джерелі.

Тому для зменшення негативного впливу вібрації і шуму є встановлення електродвигуна на спеціальному залізобетонній платформі, з його подальшою шумо- та віброізоляція. Забезпечення відповідного контакту між обертовими елементами вала диспергатора та корпусу апарату.

Для зменшення виробничого шуму передбачено своєчасне змащування всіх поверхонь, що труться, використання звукоізолюючих панелей, перегородок, спеціальних кожухів.

В якості індивідуального захисту проти шуму пропонується використовувати навушники ПШН-Б, що призначені для захисту органів слуху від впливу шуму з рівнем до 65 дБА, що відповідає ДСН 3.3.6037-99.

2.7.4 Безпека при роботі рухомих та обертових частин

Обертаючими механізмами в установці є: муфти, шестерні, вали. Ці механізми являються небезпечними через наявність ризику нанесення травм робітнику. Шестерні і вали закриті спеціальними металевими корпусами з фарбуванням в червоний колір. Для аварійної зупинки устаткування передбачена аварійна кнопка відключення, яка знаходиться на обладнанні оператора лінії.

Робота розпочинається з перевірки:

- 1) робочого місця, яке необхідно утримувати в чистоті та порядку;
- 2) справності устаткування та його частин;
- 3) наявності захисних огорожень;
- 4) електрообладнання та проводів;
- 5) справності аварійного відключення обладнання.

До обслуговування лінії допускаються особи, що пройшли спеціальне навчання та отримали право працювати на даному типі обладнання. Для уникнення ризику отримання механічних травм на виробництві, необхідно проводити інструктаж безпеки щодо роботи з елементами устаткування, які рухаються (обертаються).

Під час роботи лінії забороняється виконувати ремонт, наладку та змащування частин, що рухаються, доторкатись до гарячих та рухомих частин, працювати при відкритих щитках та огороженнях.

У випадку виникнення небезпеки, несправності обладнання потрібно терміново вимкнути устаткування натисканням аварійної кнопки “СТОП”, повідомивши про ситуацію начальника цеха.

2.7.5 Безпека при надзвичайних ситуаціях

Однією з найбільш поширених причин виникнення надзвичайних ситуацій є вибух балонів, внаслідок неправильної експлуатації, оскільки в

виробничих приміщеннях часто зберігаються балони наприклад з киснем, ацетиленом для зварювальних апаратів.

Балон повинен бути розрахований так, щоб напруження в стінках при гідравлічному випробуванні не перевищували 90% границі текучості для даної марки сталі.

Випробування балонів проводиться 1-2 рази на рік, оскільки термін їх зберігання становить 2 роки.

На верхній частині кожного балону обов'язковим є наявність відповідних даних, а саме:

- товарний знак підприємства, що його виготовив;
- дата виготовлення та номер балону;
- дата останнього та наступного випробувань;
- робочий тиск;
- матеріал з якого виготовлений корпус;
- об'єм і маса.

Щоб запобігти помилковому заповнення, кожен балон фарбується відповідним кольором (кисень – синій, аміак – жовтий, азот – чорний). Балони необхідно зберігати в вертикальному положенні та в спеціально відведених місцях, що мають огорожу для запобігання їхньому падінню, з вентилями повернутими на одну сторону.

Газові балони, що розташовані в приміщенні, необхідно ізолювати від предметів, що нагріваються на відстань більше 1 м, а від відкритих джерел вогню на 5-6 м.

Робітники повинні пройти спеціальний інструктаж по експлуатації балонів для зниження ризику виникнення надзвичайних ситуацій

2.7.6 Пожежонебезпека

На місці роботи оператора можуть займатися дерев'яні та термопластичні елементи інтер'єру з температурою займання 380-420°C. Також цех виробництва гранульованих гуміново-мінеральних добрив містить елементи,

що можуть займатися: машинне масло, електропроводи, електрообладнання, тому це приміщення відноситься до категорії В та зони пожежонебезпеки класу П-Па за ПУЕ.

Експлуатація лінії проводиться при дотриманні правил пожежної безпеки. Температура при якій займаються гранули становить 500°C, тобто самозаймання продукції практично неможливе через підтримку температури повітря робочої зони у літній період не вище 26°C.

Причинами виникнення пожежі на виробничій лінії є:

- 1) використання відкритого вогню;
- 2) коротке замикання;
- 3) несправність електрообладнання;
- 4) використання легкозаймистих речовин, та їхнє зберігання біля устаткування.

Заходи по запобіганню пожежонебезпечних випадків:

- 1) дотримання правил експлуатації та технологічних норм;
- 2) дотримання вимог пожежної безпеки;
- 3) обмеження в застосуванні відкритого вогню;
- 4) спеціально відведені місця для паління;
- 5) проведення інструктажу обслуговуючого персоналу;
- 6) застосування агітаційних матеріалів щодо техніки безпеки на виробництві;
- 7) наявність засобів гасіння та захисного спорядження;
- 8) наявність пожежної сигналізації;

Гасіння невеликих вогнищ відбувається при знеструмленому електрообладнанні, застосовуючи вуглекислотні вогнегасники ОУ-3 та ОУ-5. Для гасіння увімкненого обладнання застосовуються порошкові вогнегасники типу ОП-9. Цех має пожежні гідранти з довжиною рукава 10 м, що розташовуються на відстані 30 м один від одного. Кількість евакуаційних виходів– 3 з шириною дверей – 2,5 м згідно з СНіП 2.09.02-85.

Перед початком роботи слід перевірити:

- 1) робоче місце кожного з працівників;

- 2) справність обладнання та окремих механізмів;
- 3) наявність захисних огорожень;
- 4) справність електрообладнання та наявність заземлення на устаткуванні;
- 5) справність витяжної вентиляції, підключеної до установки;
- 6) справність аварійної кнопки “СТОП” та блокуючого обладнання.

При появі будь-якої небезпеки, поміченої несправності, треба негайно вимкнути устаткування натисканням аварійної кнопки “СТОП”.

План евакуації з виробничого приміщення зображено на рисунку 2.12.

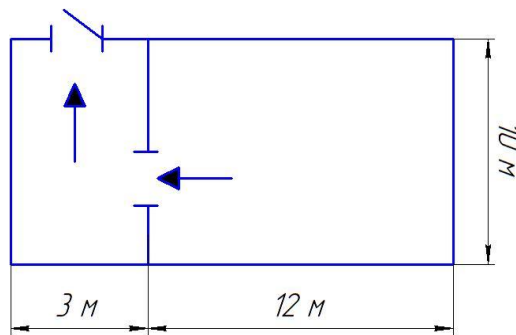


Рисунок 2.12 – План евакуації з виробничого приміщення

2.8 Висновки

1. Обґрунтовано фізичну модель процесу грануляції гуміново-мінеральних добрив при зневодненні гетерогенних рідких систем при застосуванні неоднорідного псевдозрідження;
2. Сформульовано принципи взаємодії теплоносія із зернистим матеріалом при застосуванні неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі без використання зовнішніх механічних пульсаторів при п'ятикратному перевищенні висоти зернистого матеріалу H_0 висоти пробую газопого струменя z_{ϕ} ;
3. Обрано математичну модель гідродинаміки для неоднорідного псевдозрідження та надано рекомендації щодо її розв'язання;

4. Обґрунтовано методику визначення діаметру газової бульбашки при підвищених шарах зернистого матеріалу;
5. Запропоновано та обґрунтовано методику оцінки якості гідродинаміки неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі;
6. Надано методику проведення комплексних експериментальних досліджень гідродинаміки та кінетики процесу грануляції у апараті із псевдозрідженим шаром;
7. Виконано опис експериментальної установки для виробництва гуміново-мінеральних добрив;
8. Розроблено заходи щодо безпечної праці на лінії виробництва гуміново-мінеральних добрив та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Експериментальні дослідження гідродинаміки струменево-пульсаційного псевдозрідження

Метою експериментальних досліджень було визначення впливу висоти зернистого матеріалу в шарі на параметри неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження та умови досягнення якісних показників при переході в автоколивальний режим.

Дослідження проводилися на експериментальній установці, описаній в пункті 2.7, з розмірами камери гранулятора $A \times B \times H = 0,3 \times 0,11 \times 1,5$ м, спорядженою ГРП щілинного типу з коефіцієнтом живого перерізу $\phi = 4,9$ %.

У якості зернистого матеріалу слугували гранули амонію сульфату з домішками гумінових речовин, еквівалентний діаметр яких становив $d_e = 2,5$ мм і питомою поверхнею $a = 1440$ м²/м³. Густина гранульованого продукту становила $\rho_T = 1450 \pm 10$ кг/м³. Висота нерухомого шару в камері гранулятора визначалася з умов масообміну при стійкій кінетиці процесу і становила $H_{0(1)} = 0,32$ м, $H_{0(2)} = 0,37$ м, $H_{0(3)} = 0,42$ м.

3.1.2 Параметри гідродинаміки струменево-пульсаційного псевдозрідження при висоті нерухомого шару зернистого матеріалу $H_{0(1)} = 320$ мм

За результатами досліджень одержано криву псевдозрідження для еквівалентного діаметра d_e мм та висоти шару матеріалу $H_{0(1)} = 320$ мм при відношенні $z_{\phi}/H_0 \leq 0,25$ з масою шару $M_{\text{ш}} = 8$ кг, рисунок 3.1. При цьому номінальний гідростатичний тиск в шарі $\Delta P_{\text{гiдр.}(320)} = H_0(1 - \epsilon_0)\rho_T g K_a = 2400$ Па.

де $K_a = 0,875$ – враховує конфігурацію камери гранулятора.

Крива псевдозрідження, зображена на рисунку 3.1, має умовне розбиття на 5 частин.

Рисунок 3.1 – Крива псевдозрідження для $H_{0(1)}=320$ мм

Зона 1 при числі псевдозрідження $0 \leq K_w < 0,62$ характеризує рух газового агенту в фільтраційному режимі через обидві щілини. До того ж порозність шару по зонах камери апарату однакова $\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \varepsilon_{III} = \varepsilon_0 = 0,4$.

Зона 2 при $0,62 \leq K_w < 1,01$ характеризується пробоем газового факела у правій щілині зі збільшенням порозності в зоні III ($\varepsilon_{III} \rightarrow 0,55$). При цьому ліва щілина лишається працювати у фільтраційному режимі, тому $\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = 0,4$, тому інерційний викид матеріалу в надшарову зону зі збільшенням висоти не відбувається.

Зона 3 при $1,01 \leq K_w < 1,39$ характеризується пробоем газового факела в лівій щілині при $K_w = 1,15$. Працюють обидві щілини. При подальшому збільшенні витрати газового агента до $K_w = 1,3$ реалізується пульсаційний режим із частотою пульсацій шару більше 1,5 Гц та невеликим перевищенням гідростатичного опору $\Delta P_{\text{амп.}} = \Delta P_{\text{max}} - \Delta P_{\text{гидрост.}(0)} = 380$ Па. Але суттєве переміщення матеріалу, за межі початкового шару відсутнє.

За умови $(1,5 \leq K_w < 1,74)$ та $w_{\text{ш}} = 31,1$ м/с відбувається вхід в автоколивальний режим неоднорідного псевдозрідження. Робота в зоні 4 характеризується інтенсивним об'єднанням струменів з лівої та правої щілин та утворенням газової бульбашки, що займає 1/3 ширини апарата, яка спричиняє інтенсивний пульсаційний викид матеріалу за межі початкового шару.

При $K_w \geq 1,74$ та $w_{\text{ш}} \geq 35,8$ м/с відбувається інтенсивний рух зернистого матеріалу в зоні Д. Для цих умов проведена відеофіксація та наведені її фрагменти на рисунку 3.2.

Аналіз наведених фотофіксацій на рисунку 3.2 підтверджує положення фізичної моделі та показує, що $\tau_u = 0,51$ с, а частота становить $f_u = 1,96$ Гц при мінімальних розмірах малорухливих зон на поверхні ГРП в зоні Д.

Рисунок 3.2 – Фотофіксація гідродинамічної обстановки в камері гранулятора при $H_{0(1)}=320$ мм, $d_e = 2,5$ мм ($\tau_y=0,51$ с, $w_{г(пр)}= 1,52$ м/с, $f=1,96$ Гц та $K_w=1,74$)

Продовження рисунку 3.2.

Рисунок 3.2 – Фотофіксація гідродинамічної обстановки в камері гранулятора при $H_{0(1)}=320$ мм, $d_e = 2,5$ мм ($\tau_y=0,51$ с, $w_{г(пр)}= 1,52$ м/с, $f=1,96$ Гц та $K_w=1,74$)

Для цих умов визначалась динаміка зміни порозності в зоні Д для $d_e = 2,5$ мм при $H_{0(1)}=320$ мм та $K_w = 1,74$ для вибраного інтервалу часу, що наведено на рисунку 3.3.

Рисунок 3.3 – Динаміка зміни порозності в зоні Д при $H_{0(1)}=320$ мм
та $K_w = 1,74$

$[\varepsilon_d] =$

Відповідно до розділу 2.5, розра $\tau_y = \tau_y$ тася динаміка функції втрат якості L_d в зоні Д, яка показує, що задовільне значення функції L_d існує протягом всього циклу, рисунок 3.4. Тобто індекс динамічної якості гідродинаміки $i_y = \tau_y / \tau_y \rightarrow 1,0$, оскільки функція втрат якості $L \rightarrow 0$ ($0 \leq L \leq 0,1$).

Рисунок 3.4 – Динаміка зміни функції втрат гідродинамічної
якості при $H_{0(1)}=320$ мм та $K_w = 1,74$

Для цих умов, за методикою 2.6.2 розраховувалась динаміка зміни частки початкового шару $\Delta M/M_0$ в циклі автоколивального режиму, рисунок 3.5.

Максимальне значення цього параметру $\Delta M/M_0=0,429$ досягається в $0,8\tau_y$ за $0,41$ с. Тобто частота винесення становить $f \geq 2$ Гц.

Рисунок 3.5 – Динаміка зміни частки матеріалу винесеного за межі початкового шару при $H_{0(1)}=320$ мм, $\tau_y=0,51$ с, $K_w = 1,74$, $w_{г(прив)} = 1,52$ м/с

Отже, ці позитивні результати досягнуті тоді, коли розраховувався діаметр бульбашки $d_6 = 0,111$ м, що становить $1/3A$ (ширини камери гранулятора), яка утворюється на вертикальній межі на висоті $\Delta + z_{\phi} = 40 + 80$ мм. Таким чином орієнтовна висота розташування верхньої точки газової бульбашки буде становити:

$$H_{\text{від}} = \Delta + z_{\phi} + d_6 = 40 + 80 + 111 = 221 \text{ мм}$$

Звідси випливає, що розрахункова висота над газовою бульбашкою в момент її руху дорівнює:

$$\Delta h = H_0 - H_{\text{від}} = H_0 - (\Delta + z_{\phi} + d_6) = 320 - 221 = 99 \text{ мм}$$

Таким чином, в зоні III формується канал газового середовища загальною висотою 221 мм, що становить $0,7H_0$.

За цих умов при значеннях числа псевдозрідження $K_w \geq 1,74$, приведеної швидкості газової фази $w_{\Gamma(\text{прив})} \geq 1,52$ м/с і в щілинах ГРП в межах $w_{\text{щ}} \geq 35,8$ м/с досягається шляхом винесення за межі початкового шару більше 42,9% маси шару при значенні $i_{\text{я}} = 1$ при $L_{\text{д}} \leq 0,1$.

3.1.2 Параметри струменево-пульсаційного псевдозрідження при висоті нерухомого шару зернистого матеріалу $H_{0(2)} = 370$ мм

Аналогічно визначено криву псевдозрідження при збільшенні нерухомого шару на 15% до $H_{0(2)} = 370$ мм з еквівалентним діаметром частинок d_e мм.

При цьому маса шару та гідростатичний тиск збільшились і становлять $M_{\text{ш}(2)} = 9,72$ кг та $\Delta P_{\text{гидр.}(370)} = H_{0(2)}(1 - \epsilon_0)\rho_{\text{т}}gK_a = 2887$ Па. Відношення висоти пробою газового струменя до висоти нерухомого шару $z_{\phi}/H_0 \leq 0,21$.

Крива псевдозрідження наведена по аналогії як і для $H_{0(1)} = 320$ мм при $d_e = 2,5$ мм, рисунок 3.6, розділено на 5 умовних зон:

- Зона 1 ($0 \leq K_w < 0,71$) – рух газового агента через дві щілини в режимі фільтрації ($\epsilon_I = \epsilon_{II} = \epsilon_{III} = \epsilon_0 = 0,4$);
- Зона 2 ($0,71 \leq K_w < 1,08$) – поява газового струменя в правій щілині при ($\epsilon_I = \epsilon_{II} = 0,4$; $\epsilon_{III} = f(\tau)$);

- Зона 3 ($1,08 \leq K_w < 1,64$) – поява газового струменя в лівій щілині при $K_w = 1,26$ ($\varepsilon_I = 0,4$; $\varepsilon_{II} = f(\tau)$; $\varepsilon_{III} = f(\tau)$);
- Зона 4 ($1,64 \leq K_w \leq 1,88$) – струменево-пульсаційне псевдозрідження в автоколивальному режимі ($\varepsilon_I = 0,4$; $\varepsilon_{II} = f(\tau)$; $\varepsilon_{III} = f(\tau)$);
- Зона 5 ($K_w \geq 1,88$) – якісний автоколивальний режим.

Рисунок 3.6 – Крива псевдозрідження для $H_{0(2)}=370$ мм

Фотофіксація відеофрагментів наведена на рисунку 3.7.

Аналіз результатів експериментів показує, що збільшення висоти нерухомого шару на 15% призводить до збільшення τ_y з 0,51 до 0,54 с, що характеризується частотою $f=1,848$ Гц. Одночасно з цим спостерігається збільшення газової бульбашки $d_6=140$ мм, розмір якої практично дорівнює половині ширини апарата, рисунок 3.7 ($0,25 \leq \tau \leq 0,34$ с). Це суттєво змінює локальний гідравлічний опір і спричиняє рух бульбашки і відповідно зернистого матеріалу через зону II, центральну частину апарата.

Тобто динамічно створюються умови, коли миттєві значення гідравлічного опору над лівою щілиною більше ніж в напрямку до лінії з'єднання з газовим струменем, що виходить з правої щілини.

В результаті динаміка зміни порозності в зоні Д деякий час має значення нижче $[\varepsilon_D]=0.85$, рисунок 3.8.

Рисунок 3.7 – Фотофіксація гідродинамічної обстановки в камері гранулятора при $H_{0(2)}=370$ мм, $d_e = 2,5$ мм ($\tau_y=0,54$ с, $w_{Г(пр)}= 1,64$ м/с, $f=1,848$ Гц та $K_w=1,88$)

Звідси динаміка зміни функції L_d втрат гідродинамічної якості при цих умовах дозволяє визначити час якісного процесу, рисунок 3.9.

Рисунок 3.8 – Динаміка зміни порозності в зоні Д при $H_{0(2)}=370$ мм,

$[\varepsilon_D] =$

$$K_w = 1,88$$

Рисунок 3.9 – Динаміка зміни функції втрат гідродинамічної якості при $H_{0(2)}=370$ мм та $K_w = 1,88$

Тоді $i_y = \tau_y / \tau_u = 0,21/0,54 = 0,61$. Отже, збільшення висоти нерухомого шару при сталих значеннях $(\Delta + z_\phi)$ зумовлює пропорційне збільшення розрахункового діаметра газової бульбашки, що наближається за розмірами до половини ширини апарату. Тобто, на висоті $\Delta + z_\phi = 120$ мм, що становить $0,324 H_{0(2)}$ починає утворюватись бульбашка, яка суттєво змінює гідравлічний опір в зоні введення газового потоку в точці p , рисунок 3.7, що призводить до зменшення індексу динамічної якості в зоні Д.

При цьому активно реалізується струменево-пульсаційне псевдозрідження в автоколивальному режимі, який супроводжується інтенсивним перемішуванням.

Динаміка зміни частки винесеного матеріалу за межі початкового шару $\Delta M/M_0$ наведена на рисунку 3.10.

Рисунок 3.10 – Динаміка зміни частки матеріалу винесеного за межі початкового шару при $H_{0(2)}=370$ мм, $\tau_u = 0,54$ с, $K_w = 1,88$, $w_{Г(прив)} = 1,64$ м/с

Як і в попередньому випадку максимальні значення параметра $\Delta M/M_0$ практично однакові і більше $0,4 M_0$. Тому при збільшенні висоти нерухомого шару необхідно змінювати параметр $(\Delta + z_\phi)$ та ширину апарату.

3.1.3 Параметри струменево-пульсаційного псевдозрідження при висоті шару зернистого матеріалу $H_{0(3)}=420$ мм

Аналогічно визначено криву псевдозрідження при збільшенні нерухомого шару на 31% до $H_{0(3)}=420$ мм з еквівалентним діаметром частинок d_e мм. При цьому маса шару та гідростатичний тиск збільшились і становлять

$M_{III(3)}=11,32$ кг та $\Delta P_{\text{гiдр.}(420)} = H_{0(3)}(1-\varepsilon_0)\rho_{\text{тг}}gK_a = 3367$ Па. Відношення висоти пробою газового струменя до висоти нерухомого шару $z_{\text{ф}}/H_0 \leq 0,19$.

Крива псевдозрідження наведена по аналогії як і для $H_{0(2)}=370$ мм при $d_e = 2,5$ мм, рисунок 3.11, розділено на 5 умовних зон:

- Зона 1 ($0 \leq K_w < 0,72$) – рух газового агента через дві щілини в режимі фільтрації, нерухомий шар ($\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \varepsilon_{III} = \varepsilon_0 = 0,4$);
- Зона 2 ($0,72 \leq K_w < 1,1$) – поява газового струменя в правій щілині, до того ж ($\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = 0,4$; $\varepsilon_{III} > 0,5$);
- Зона 3 ($1,1 \leq K_w < 1,69$) – поява газового струменя в лівій щілині при $K_w = 1,3$ ($\varepsilon_I = 0,4$; $\varepsilon_{II} > 0,5$; $\varepsilon_{III} > 0,5$);
- Зона 4 ($1,69 \leq K_w \leq 1,93$) – струменево-пульсаційне псевдозрідження в автоколивальному режимі ($\varepsilon_I = 0,4$; $\varepsilon_{II} > 0,5$; $\varepsilon_{III} > 0,5$);
- Зона 5 ($K_w \geq 1,93$) – початок якісного режиму псевдозрідження з урахуванням динаміки порозності в зоні Д.

Фотофіксація фрагментів гідродинамічного стану наведена на рисунку 3.12, $\tau_{\text{ц}}=0,626$ і відповідно частота $f=1,597$ Гц. При цьому розмір бульбашки $d_{\delta}=168$ мм, що перевищує 1/2 ширини апарата ($0,066 \leq \tau \leq 0,198$ с). Одночасно у нижній частині апарату утворюється додаткова газова бульбашка, яка призводить до псевдо поршневого режиму.

Рисунок 3.11 – Крива псевдозрідження для $H_{0(3)}=420$ мм

При цьому максимальне значення частки матеріалу винесеного за межі початкового шару $\Delta M/M_0=0,395$ (39,5%), рисунок 3.13, що практично однакове з попередніми.

Рисунок 3.12 – Фотофіксація гідродинамічної обстановки в камері гранулятора при $H_{0(3)}=420$ мм, $d_e = 2,5$ мм ($\tau_{\text{ц}}=0,626$ с, $w_{\text{г(пр)}}= 1,68$ м/с, $f=1,597$ Гц та $K_w=1,93$)

Тобто підвищення висоти нерухомого шару на 31%, практично не впливає на інтенсивність об'ємного перемішування з частотою $f=1,597$ Гц.

Рисунок 3.13 – Динаміка зміни частки матеріалу винесеного за межі початкового шару при $H_{0(3)}=420$ мм, $\tau_u=0,626$ с, $K_w=1,93$, $w_{Г(прив)}=1,68$ м/с

При співвідношенні $(\Delta+z_\phi)/H_{0(3)}=120/420=0,285$ залишкова висота в зоні III навіть в кінці другої стадії циклу буде більшою ніж $\Delta+z_\phi$. Тобто з підвищенням висоти процес винесення матеріалу в надшаровий простір пов'язаний з послідовним утворенням декількох бульбашок. Причому найбільше часу іде на утворення першої більшої бульбашки, після початку руху утворюється менша бульбашка, яка маючи більшу швидкість у вертикальному напрямку з'єднується з першою.

Це приводить до збільшення об'єму, який займає об'єднана газова бульбашка в середині зернистого шару. Таким чином, на висоті $\Delta+z_\phi$ над лівою щілиною ГРП утворюється зона заповнена газовою бульбашкою з розрахунковим діаметром $d_0 \geq 160$ мм (з порозністю $\varepsilon_0 \rightarrow 1,0$), що становить 38% від початкової висоти шару. Тобто, є миттєве зменшення гідростатичного опору над лівою щілиною на 38%, що призводить до зміни руху газового струменя у вертикальному напрямку та спричиняє ризик утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП.

Напрямок і рух газових струменів весь час корелюється потоками руху зернистого матеріалу з надшарового простору, але це не суттєво впливає на рух газового середовища в зернистому матеріалі.

Ці висновки підтверджуються і динамікою зміни порозності в зоні Д при $H_{0(3)}=420$ мм і $K_w=1,93$, рисунок 3.14 та залежністю функції втрат якості $L_D=f(\tau)$, рисунок 3.15.

Рисунок 3.14 – Динаміка зміни порозності в зоні Д при $H_{0(3)}=420$ мм
та $K_w=1,93$

$[\varepsilon_d] =$

Враховуючи отримані значення фізичних величин, остаточні висновки можливо зробити після проведення експериментів по грануляції при застосуванні струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження при $z_{\phi}/H_{0(3)} \leq 0,19$.

Рисунок 3.15 – Динаміка зміни показника втрат гідродинамічної якості при $H_{0(3)}=420$ мм та $K_w = 1,93$
 $[L_d] \leq$

При цьому індекс динамічної якості $i_y = \tau_y / \tau_u = 0,21 / 0,626 = 0,58$.

3.2 Перевірка адекватності математичної моделі

Метою експериментальних досліджень була перевірка положень адекватності фізичної та математичної моделі.

Для розв'язання математичної моделі було визначено пульсаційний автоколивальний характер зміни порозності шару в фіксованому об'ємі апарата та зміну загального перепаду тиску згідно методики, що описана у пункті 2.6.2.

Динаміка зміни порозності по зонах (I, II, III) камери гранулятора і її середнє значення при висотах шару зернистого матеріалу $H_{0(1)} = 320$ мм, $H_{0(2)} = 370$ мм, $H_{0(3)} = 420$ мм наведено на рисунку 3.16 (а, б та в) відповідно.

Розраховано коефіцієнт кореляції $R \geq 0,983$ по порозності в апараті для кожного із випадків.

На рисунку 3.16 помітно, що при збільшенні висоти шару збільшується екстремум порозності у III зоні камери гранулятора, але середня порозність по зонах зменшується.

Узагальнене рівняння зміни порозності в апараті для висот $H_{0(1)} = 320$ мм, $H_{0(2)} = 370$ мм, $H_{0(3)} = 420$ мм представлено у вигляді рівняння 3.1.

$$\varepsilon_r(\tau_i) = \varepsilon_{r(\min)} + A + A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T}(\tau_i - \tau_{\text{ц}}(n - 1)) - K_{\text{зДВ.}}\right), \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} &\text{а) } H_{0(1)} = 320 \text{ мм, } K_w = 1,74: \\ &R_{\text{сер}} = 0,998; R_2 = 0,99; R_3 = 0,992 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{б) } H_{0(2)} &= 370 \text{ мм, } K_w=1,88: \\ R_{\text{сеп}} &= 0,993; R_2=0,988; R_3=0,986 \\ \text{в) } H_{0(3)} &= 420 \text{ мм, } K_w=1,93: \\ R_{\text{сеп}} &= 0,99; R_2=0,985; R_3=0,983 \end{aligned}$$

Рисунок 3.16 – Динаміка зміни порозності шару в зонах *I, II, III* камери гранулятора при $H_{0(1)} = 320$ мм, $H_{0(2)} = 370$ мм, $H_{0(3)} = 420$ мм

де $\varepsilon_{\Gamma(\min)}$, $\varepsilon_{\Gamma(\max)}$ – мінімальне (при $\tau = 0$) та максимальне (при $\tau = 0,75\tau_{\text{ц}}$) значення порозності у шарі, що отримані під час дослідження; $A = (\varepsilon_{\Gamma(\max)} - \varepsilon_{\Gamma(\min)})/2$ – амплітуда коливань; T – період коливань, с: $T = 1,5 \cdot \tau_{\text{ц}}$ – період перших двох стадій циклу ($\tau_i = 0 \dots 0,75\tau_{\text{ц}}$); $T = 0,5\tau_{\text{ц}}$ – період третьої стадії циклу ($\tau_i = 0,75\tau_{\text{ц}} \dots \tau_{\text{ц}}$); n – номер пульсації за порядком, одиниць; $K_{\text{здв.}} = 5\pi/10$ – фазовий зсув при пульсаціях.

Середнє значення порозності в камері апарату розраховується за формулою:

$$\varepsilon_{\Gamma(\text{сеп})}(\tau_i) = \frac{\varepsilon_{\Gamma(I)}(\tau_i) \cdot V_I + \varepsilon_{\Gamma(II)}(\tau_i) \cdot V_{II} + \varepsilon_{\Gamma(III)}(\tau_i) \cdot V_{III}}{V_I + V_{II} + V_{III}}, \quad (3.2)$$

де $\varepsilon_{\Gamma(II)}$ та $\varepsilon_{\Gamma(III)}$ – порозність в зонах *II* та *III*; V_I , V_{II} , V_{III} – об'єми зон *I, II* та *III* у фіксованому об'ємі гранулятора.

Середня порозність розрахована для кожного значення τ_i після підстановки в рівняння математичної моделі дозволила розрахувати динаміку зміни загального гідравлічного опору в заданому об'ємі зернистого матеріалу, рисунок 3.17.

Розрахований коефіцієнт кореляції динаміки зміни гідравлічного опору в апараті для висоти $H_{0(1)}=320$ мм ($R \geq 0,975$), $H_{0(2)}=370$ мм ($R \geq 0,927$), $H_{0(3)}=420$ мм ($R \geq 0,845$).

$$\text{а) } H_{0(1)} = 320 \text{ мм, } K_w=1,74: R=0,975$$

Рисунок 3.17 – Динаміка зміни гідравлічного опору шару

Продовження рисунку 3.17.

$$\text{б) } H_{0(2)} = 370 \text{ мм, } K_w=1,88: R=0,927$$

$$в) H_{0(3)} = 420 \text{ мм}, K_w = 1,93; R = 0,845$$

Рисунок 3.17 – Динаміка зміни гідравлічного опору шару

Таким чином, обрана математична модель для неоднорідного псевдозрідження адекватно описує спосіб взаємодії твердих частинок із зріджувальним агентом. Шляхом експериментальних досліджень зроблено перевірку адекватності фізичної моделі, при переході неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальний режим, дотримуючись індексу гідродинамічної якості $i_{\text{я}} \rightarrow 1,0$ ($H_{0(1)} = 320$ мм), $i_{\text{я}} = 0,61$ ($H_{0(2)} = 370$ мм), $i_{\text{я}} = 0,58$ ($H_{0(3)} = 420$ мм).

3.3 Дослідження кінетики процесу грануляції гуміново-мінеральних добрив

Метою експериментальних досліджень була перевірка теоретичних положень щодо утворення комплексних гуміново-мінеральних добрив з пошаровою структурою, шляхом зневоднення та грануляції рідких гетерогенних систем в дисперсних середовищах із застосуванням апарата, що працює у автоколивальному режимі струменево-пульсаційного псевдозрідження.

Перевірка доцільності застосування неоднорідного автоколивального псевдозрідження при грануляції інноваційних гуміново-мінеральних добрив проводилась на експериментальній установці, рисунок 2.9 наведений у пункті 2.7.

Для грануляції використовувалися водні розчини сульфату амонію та домішками гуматів, рисунок 3.18.

Рисунок 3.18 – Склад робочого розчину

У якості початкових центрів грануляції використовувались гранули сульфату амонію із домішками гумінових речовин з еквівалентним діаметром $d_e = 1,8$ мм, початковою масою $M_{\text{ш}} = 11,32$ кг та початковою висотою нерухомого шару $H_0 = 420$ мм.

Диспергування робочого розчину проводилось механічним диспергатором конічного типу, розміщеного в середині зони II на висоті 220 мм.

Впродовж дослідів маса шару підтримувалась постійною, шляхом вивантаження гранульованого продукту.

Витрати теплоносія протягом дослідів $V_{\text{газ}}=0,034 \text{ м}^3/\text{с}$ підтримувалися сталим. Тому при збільшенні d_e число псевдозрідження буде зменшуватись. Початкове число псевдозрідження $K_{w0}=1,693$.

Результат експериментальних досліджень кінетики процесу гранулоутворення гуміново-мінеральних добрив наведені в додатку Г.

Температура в шарі підтримувалась $T_{\text{ш}}=95\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ за показами термopар (розташованих в зоні II на відстані $h_m=8 \text{ мм}$). Температура теплоносія на вході до апарату в усталеному режимі змінювалась в діапазоні $T_{\text{вх}}=195 - 245 \text{ }^\circ\text{C}$, рисунок 3.19.

Рисунок 3.19 – Динаміка зміни температур

Обґрунтовано вибір $T_{\text{ш}}=95\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, при якому початкова приведена швидкість газу в апараті при $\tau=0 \text{ с}$, $w_e = 1,044 \text{ м/с}$ і $w_{\text{ш}}=22,89 \text{ м/с}$ за нормальних умов.

За цих умов при застосуванні струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі при $0 \leq \tau \leq 0,3$ годин швидкість росту гранул становить $\Delta d / \Delta \tau = 0,485 \text{ мм/год}$, рисунок 3.20.

Рисунок 3.20– Динаміка зміни еквівалентного діаметру гранул

Підвищення температури на $30 \text{ }^\circ\text{C}$ до $245 \text{ }^\circ\text{C}$ без суттєвого підвищення $T_{\text{ш}}$, призводить до зниження швидкості росту d_e в діапазоні часу $0,33 \leq \tau \leq 0,66$ годин (швидкість росту гранул $\Delta d / \Delta \tau = 0,133 \text{ мм/год}$), що в 3,6 рази менше за попередній. Це пояснюється тим, що теплової енергії гранули було недостатньо щоб зупинити фронт насичення на її поверхні. Тому просочення рідкої фази в

середину гранули знижує її міцність, що призвело до стирання зовнішнього шару.

Повернення параметрів теплоносія до попередніх значень ($0,66 \leq \tau \leq 1$ год), рисунок 3.19, зумовили підвищення швидкості росту гранул $\Delta d / \Delta \tau = 0,303$ мм/год.

Інтенсивність процесів тепломасообміну підтверджує і динаміка зміни окремих масових фракцій, рисунок 3.21.

Рисунок 3.21 – Динаміка зміни масових відсотків окремих фракцій

Так зменшення впродовж дослідів $0,0 \leq \tau \leq 1$ годин масового відсотка фракцій +1,0 мм із 40 до 28%, супроводилось збільшенням масових відсотків фракцій +2,0 мм з 50 до 56%, а +3,0 мм з 8 до 16%. Такий характер динаміки зміни фракцій свідчить про наявність часткової агломерації. Цього можна було уникнути шляхом збільшення витрат газового теплоносія. Але витрати газового теплоносія не підвищились.

Тобто зменшилося число псевдозрідження, рисунок 3.22, і відповідно динаміка зміни розрахункового індекса перемішування J_{AM} буде зменшуватись, рисунок 3.23.

Рисунок 3.22 – Динаміка зміни розрахункового числа псевдозрідження

Рисунок 3.23 – Динаміка зміни розрахункового індексу перемішування

Розрахункові значення частоти пульсацій шару зернистого матеріалу наведено на рисунку 2.24.

Рисунок 3.24 – Динаміка зміни розрахункової частоти пульсацій шару

Навіть за таких умов досягнуто значення питомого навантаження шару за вологою $a_f = 0,4 - 0,43$ кг/м² год, спостерігається швидкість росту гранул $\Delta d / \Delta \tau \geq 0,3$ мм/год, що в 1,3 рази більше ніж при барботажному режимі, рисунок 3.25.

Рисунок 3.25 – Динаміка зміни питомого навантаження шару
за вологою

Стійка кінетика процесу підтверджується динамічним коефіцієнтом гранулоутворення, рисунок 3.26.

Рисунок 3.26 – Динаміка зміни коефіцієнта гранулоутворення

Після завершення експериментів встановлено, що навіть при розрахунковому індексу динамічної якості, рисунок 3.27, на поверхні ГРП в зоні Д наплавлення матеріалу не відбувається.

Рисунок 3.27 – Динаміка зміни розрахункового індексу гідродинамічної якості

В результаті був одержаний гранульований продукт, який має сфероподібну форму, чітко виражену пошарову структуру з розподілом компонентів мінерального, органічного та стимулюючих гумінових по всьому об'єму, рисунок 3.28, а їх міцність більше 10 Н/гранулу, рисунок 3.29.

а)

б)

Рисунок 3.28 – а) Загальний вигляд гранул; б) пошарова структура

Рисунок 3.29– Міцність гранульованого продукту

3.4 Висновки

1. Проведено експериментальні дослідження характеристик струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі при висотах нерухомого шару гранул матеріалу $H_{0(1)} = 320$ мм, $H_{0(2)} = 370$ мм, $H_{0(3)} = 420$ мм та встановлено умови проведення якісного гідродинамічного режиму;

2. Проведено оцінку якості гідродинамічного режиму при висотах нерухомого шару матеріалу $H_{0(1)} = 320$ мм, $H_{0(2)} = 370$ мм, $H_{0(3)} = 420$ мм;

3. Виконано перевірку адекватності математичної моделі та положення фізичної моделі шляхом визначення динаміки зміни гідравлічного тиску в апараті при підвищених висотах шару матеріалу;

4. Експериментально визначено динаміку зміни порозності в базових зонах камери гранулятора та динаміку зміни порозності в зоні Д (на робочих поверхнях ГРП) при відношенні висоти пробою газового факела до висоти шару $z_{\phi}/H_0 \leq 0,21$;

5. Експериментально визначено індекс динамічної якості при застосуванні струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі та встановлено, що якість гідродинаміки при збільшенні висоти нерухомого шару зменшується;

5. Проведені дослідження кінетики процесу гранулоутворення інноваційних гуміново-мінеральних добрив сферичної, пошарової структури при висоті шару матеріалу $H_{0(3)} = 420$ мм при застосуванні неоднорідного псевдозрідження в атоколивальному режимі. Ці результати свідчать про збільшення питомого навантаження поверхні шару за вологою до $0,40 - 0,43$ кг вол/м² год, що в 1,30 раз перевищує це значення для барюотажного режиму із коефіцієнтом грануляції $\psi \geq 88\%$.

4 ОБГРУНТУВАННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Опис технологічного процесу виготовлення гуміново-мінеральних добрив

За результатами теоретико-експериментальних досліджень було розроблено технологічну схему установки лінії виробництва інноваційних гуміново-мінеральних добрив, рисунок 4.1. Відповідно до вимог, що ставляться до проведення процесу грануляції та до готової продукції в цілому, дана установка повинна забезпечувати:

- стійкість кінетики процесу при зневодненні та грануляції з робочих розчинів у апараті із псевдозрідженим шаром;
- рівномірне розподілення мінеральних, органічних та стимулюючих гумінових компонентів по всьому об'єму гранули;
- пошарову структуру готової продукції;
- задані механічні властивості гранул (міцність, стійкість до злежування);
- надійність та оперативність керування параметрами процесу при виробництві.

Технологічна схема отримання гранульованого продукту наведена на рисунку 4.1.

Грануляція гуміново-мінеральних добрив на установці із псевдозрідженим шаром відбувається наступним чином. Атмосферне повітря 3.1 за допомогою газодувки 12 через повітряний фільтр 11 потрапляє до електричного теплогенератора 13, де відбувається його нагрівання. Гаряче повітря 3.4 з температурою $T_{\text{вх}}$, через щілини ГРП потрапляє до гранулятора 5, що спричиняє рух зернистого матеріалу, реалізуючи появу псевдозрідженого стану. Після того як шар матеріалу прогріється до температури 90-95 °С відбувається подача робочого розчину, який розподіляється в шарі з допомогою конічного диспергатора.

0.1 – амонію сульфат;	3.0 – відпрацьоване повітря;
0.2 – карбамід;	3.1 – атмосферне повітря;
0.3 – шлам;	3.4 – гаряче повітря;
0.7 – гранульований продукт;	6.6 – гумати;
0.8 – нові центри грануляції;	9.2 – робочий розчин;
1.2 – вода технічна;	9.7 – вторинний розчин.
1.9 – вода гаряча;	

1 – молоткова дробарка; 2 – мішалка; 3 – насос-дозатор; 4 – компресор;
 5 – гранулятор; 6 – бункер початкових центрів грануляції; 7 – мокрий циклон;
 8 – скруббер; 9 – ємність з водою; 10 – вентилятор; 11 – фільтр; 12 – газодувка;
 13 – теплогенератор; 14 – транспортер; 15 – бункер центрів грануляції;
 16 – ємність для збору промивної води; 17 – ємність для подачі на фасовку.

Рисунок 4.1 – Технологічна схема промислової установки виготовлення
 гуміново-мінеральних добрив

При контакті газового теплоносія із зернистим матеріалом відбувається видалення вологи із утворенням на поверхні гранул мікрокристалічного шару поживних елементів, що надійшли з робочим розчином. За рахунок багатократного проведення процесу відбувається ріст розміру гранул.

Витрати робочого розчину, який надходить до гранулятора 5, регулюють автоматично шляхом визначення температури шару в зоні зрошення.

Відпрацьоване повітря 3.0 з гранулятора із псевдозрідженим шаром 5 надходить на першу стадію очистки до мокрих циклонів 7. Після цього відпрацьоване повітря 3.0 подається на другу стадію очистки в струбер «СИОТ» 10. Очистка повітря на цих двох стадіях відбувається з використанням вторинного розчину 9.7, що надходить до мокрих циклонів 7 із ємності з мішалкою 2, а до скрубера 10 із ємності вторинного розчину 9, за допомогою насосів-дозаторів 3, рисунок 4.1.

Перший етап приготування робочого розчину 9.2, на основі карбаміду 0.2 та гуматів 6.6 з додаванням до них гарячої води 1.9, відбувається в апараті з дробаркою 1. В апараті з мішалкою 2 відбувається перемішування вторинного

розчину 9.7 з додаванням до нього амонію сульфату 0.1. На другому етапі проходить змішування розчинів 9.2 та 9.7 в трубопроводі. Після цього гомогенізований робочий розчин 9.2 насосом-дозатором 3 подається до камери гранулятора 5, рисунок 4.1.

Для того щоб покращити диспергування робочого розчину в шар зернистого матеріалу та уникнути забиття трубопроводів введення, перед гранулятором 5 встановлено компресор 4, що подає атмосферне повітря 3.1 до цього трубопроводу.

Гранульований продукт 0.7 вивантажується на транспортер 14, де проходить часткове просіювання матеріалу. Готова продукція з відповідною товарною фракцією (1,5 – 4,5 мм) потрапляє до ємності для подачі на фасовку 17. Після фасування гранульований матеріал пакують у мішки з масою 50 кг і відправляють на склад. Гранули дрібної фракції (< 1,5 мм) надходять у бункер центрів грануляції 15 і за допомогою газодувки 12 подаються до гранулятора 5, для реалізації зовнішнього рециклу. Розрідження в камері гранулятора відбувається з допомогою застосування вентилятора 10, який встановлено після скрубера 8, рисунок 4.1.

4.2 Конструктивно-технологічна концепція гранулятора

Конструктивно-технологічна концепція камери гранулятора, при застосуванні струменево-пульсаційного псевдозрідження в автокливальному режимі, при грануляції інноваційних гуміново-мінеральних добрив пошарової структури із заданими фізико-механічними властивостями, повинні забезпечувати наступні поставлені вимоги, а саме:

- тривимірну інтенсивну циркуляцію зернистого матеріалу з його проходженням через технологічні зони камери гранулятора;
- інтенсивний рух гранул в зоні контакту з високотемпературним теплоносієм на робочих поверхнях ГРП для уникнення ризику оплавлення;
- інтенсивне перемішування зернистого матеріалу в зоні зрошення;

- направлений рух гранул у надшаровому просторі з їх перенаправленням у зону релаксації з допомогою направляючої вставки.

Для досягнення цієї мети пропонується застосовувати блочно-модульну конструкцію камери гранулятора, рисунок 4.2.

Рисунок 4.2 – Блочно-модульна конструкція гранулятора

Модуль камери гранулятора має форму паралелепіпеда з розширенням в надшаровому просторі, рисунок 4.2. Таким чином, A – ширина апарату, B – довжина, яка розбивається на декілька модулів з шириною $-B_{mod}$.

Геометричні розміри промислового апарату збільшено в 3 рази в порівнянні із пілотною установкою.

$$B \geq 1/3A$$

4.3 Методика розрахунку конструктивно-технологічних параметрів для отримання інноваційних гуміново-мінеральних добрив

Метою розрахунку є визначення конструктивно-технологічних параметрів промислового гранулятора та процесу грануляції в цілому.

Склад гранульованого продукту визначається компонентним складом робочого розчину для грануляції. До камери гранулятора рідка фаза подається за допомогою насоса-дозатора, де розподіляється в псевдозрідженому шарі, використовуючи механічний диспергатор конічного типу.

Для розрахунку апарата використовувалась методика [27], [28]. Алгоритм та програму розрахунку промислового гранулятора в середовищі Mathcad наведена в додатку Е.

4.3.1 Вихідні дані для розрахунку промислового гранулятора

Продуктивність гранулятора за готовим продуктом, кг/год $G_2 = 2000$;

Еквівалентний діаметр частинок у шарі, мм $D_e = 2,5$;

Мінімальний діаметр часток у псевдозрідженому шарі, мм	$D_{\min} = 0,5;$
Порозність нерухомого шару	$\varepsilon_0 = 0,4;$
Кінцева вологість гранульованого продукту, %	$u_2 = 0,1;$
Коефіцієнт, що враховує втрати розчину в магістралі	$\alpha = 0,005;$
Концентрація початкового розчину, %	$c = 50;$
Вологовміст теплоносія перед калорифером, %	$x_0 = 0,1;$
Температура теплоносія перед калорифером, °C	$t_0 = 18;$
Температура теплоносія в шарі матеріалу, °C	$t_2 = 96;$
Температура матеріалу до гранулятора, °C	$\theta_1 = 18;$
Густина матеріалу, кг/м ³	$\rho_r = 1450;$
Теплоємність матеріалу, Дж/(кг·°C)	$C_m = 0,8;$
Теплоємність води, кДж/(кг·°C)	$C_b = 4,28;$
Розрахунковий мінімальний коефіцієнт гранулоутворення, %	$\psi = 90.$

Залежність теплофізичних параметрів зріджуючого агенту від температури t_0 , °C розраховуються за наступними виразами [28]:

- 1 – корпус апарату; 2 – ГРП; 3 – направляюча вставка;
4 – переливна перегородка; 5 – диспергатор; 6 – штуцер для відбору проб;
7 – штуцер введення теплоносія; 8 – штуцер виведення теплоносія

Рисунок 4.3 – Розрахункова схема гранулятора

- 1) густина теплового агенту, кг/м³:

$$\rho_{\text{газ}}(t) = 1,29 \cdot \frac{273}{273 + t} \quad (4.1)$$

- 2) динамічна в'язкість теплоносія, Па·с:

$$\mu(t)_{\text{газ}} = 1,71710^{-5} \cdot \left(\frac{t + 273}{273} \right)^{0,82} \quad (4.2)$$

- 3) кінематична в'язкість теплоносія, м²/с:

$$\nu(t)_{\text{газ}} = \frac{\mu(t)_{\text{газ}}}{\rho(t)_{\text{газ}}} \quad (4.3)$$

4) теплоємність теплоносія, Дж/(кг·С):

$$c(t)_{\text{газ}} = 1000 \cdot (1,0005 + 1,1904 \cdot 10^{-4} \cdot t) \quad (4.4)$$

5) теплопровідність теплоносія, Вт/(м²·С):

$$c(t)_{\text{газ}} = 2,44 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{t + 273}{273} \right)^{0,82} \quad (4.5)$$

6) залежність теплопровідності зріджувального агента від температури t , Вт/(м·К):

$$\lambda(t) = 2,44 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{t + 273}{273} \right)^{0,82} \quad (4.6)$$

7) залежність питомої ентальпії зріджувального агента від температури t та вологовмісту x , кДж/кг:

$$I(x, t) = 1,01 \cdot t + x \cdot (2493 + 1,97 \cdot t) \quad (4.7)$$

8) залежність парціального тиску водяних парів від абсолютного тиску P та вологовмісту x , Па:

$$P_{\text{п}} = P \cdot \frac{x}{x + 0,622} \quad (4.8)$$

9) залежність тиску насичення від температури t , Па:

$$P_{\text{н}} = e^{\frac{1500,3 + 23,5 \cdot t}{234 + t}}$$

(4.9)

10) залежність температури мокрого термометра від ентальпії I , С:

$$t_{\text{м}}(I) = \frac{-6,14 + 0,651 \cdot I}{(1 + 0,0097 \cdot I - 3,12 \cdot 10^{-6} \cdot I^2)} \quad (4.10)$$

4.3.2 Матеріальний розрахунок гранулятора

Враховуючи задану продуктивність апарата по гранульованому продукту G_2 та коефіцієнт гранулоутворення $\psi = 90\%$, витрата вихідного розчину розраховується як, кг/с:

$$G_1 = \frac{G_2 \cdot (1 + \alpha) \cdot (100 - u_2)}{(100 - (100 - c))\psi} \quad (4.11)$$

де $\alpha = 0,03$ – коефіцієнт втрати розчину в магістралі.

Таким чином, обираємо плунжерний насос для дозування. Насос застосовується при роботі з агресивними, корозійними середовищами [29].

Тоді кількість випареної вологи, кг/с:

$$M_v = G_1 - G_2 \quad (4.12)$$

4.3.3 Тепловий розрахунок гранулятора

Температуру псевдозрідженого шару з урахуванням властивостей компонентних складових гуміново-мінеральних добрив та умов проведення процесу приймаємо $t_{ш} = 96 \pm 2^\circ\text{C}$.

Визначення температури теплоносія на вході.

За результатами експериментальних досліджень було встановлено, що при виготовленні гуміново-мінеральних добрив нового покоління у випадку зневоднення та грануляції із розчинів гетерогенних рідких систем найбільші коефіцієнти грануляції досягаються при індексу поверхні $i = 568 \text{ м}^2/\text{м}^3$, а також за значень питомого навантаження шару за вологою $a_{f(\text{експ})} = 0,7 \text{ кг}_{\text{вол}}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ при корисній різниці температур $\Delta T_{\text{експ}} = 120^\circ\text{C}$.

Приймаємо, що необхідно забезпечити питоме навантаження поверхні шару за вологою $a_f = 1,5 \text{ кг}_{\text{вол}}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

Тоді необхідна корисна різниця температур, $^\circ\text{C}$:

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{\text{експ}}}{a_{f(\text{експ})}} a_f \quad (4.14)$$

Температура теплоносія на вході в гранулятор, $^\circ\text{C}$:

$$T_{\text{вх}} = \Delta T + T_{\text{ш}} \quad (4.14)$$

Оскільки гранулятор даного типу вважають як модель ідеального перемішування, припускаємо, що температура матеріалу після апарату рівна температурі матеріалу в шарі, °С:

$$\theta_2 = t_{\text{ш}} \quad (4.15)$$

Витрати теплоти з висушеним матеріалом, що віднесена до одного кг видаленої вологи, кДж/кг:

$$q_{\text{м}} = \frac{G_2 \cdot C_{\text{м}} \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{M_{\text{в}}} \quad (4.16)$$

Витрати теплоти в оточуюче середовище приймаємо 15% від загальних, кДж/кг:

$$q_{\text{п}} = 0,15 \cdot \Delta \quad (4.17)$$

Загальні теплові втрати віднесені до 1 кг випареної вологи, кДж/кг:

$$\Delta = 1,15 \cdot (C_{\text{в}} \cdot \theta_1 - q_{\text{м}}) \quad (4.18)$$

Ентальпія газового агента із параметрами входу до калорифера розраховується за формулою Рамзіна (4.10), кДж/кг [45]:

$$I_0 = 1,01 \cdot t_0 + (2493 + 1,97 \cdot t_0) \cdot x_0, \quad (4.19)$$

Ентальпія газового агента із параметрами на виході із калорифера розраховується за формулою Рамзіна (4.10), кДж/кг [45]:

$$I_1 = 1,01 \cdot t_1 + (2493 + 1,97 \cdot t_1) \cdot x_0, \quad (4.20)$$

Вологовміст теплоносія із параметрами на вході в апарат, кг в./кг п. [44]:

$$x_2 = \frac{I_1 + x_0 \cdot \Delta - t_2}{\Delta + 1,97 \cdot t_2 + 2493}, \quad (4.21)$$

Питомі витрати теплоти, кДж/кг:

$$q = \frac{I_1 - I_0}{x_2 - x_0} \quad (4.22)$$

Тепловий ККД гранулятора, %:

$$\eta = \frac{r_{\text{ш}}}{q}, \quad (4.23)$$

$r_{\text{ш}}$ – питома теплота пароутворення H_2O при температурі шару, кДж/кг, [45]:

$$r_{\text{ш}} = -2,362 \cdot t_{\text{ш}} + 2501 \quad (4.24)$$

Сумарні витрати теплоти, кВт:

$$Q = q \cdot M_{\text{в}} \quad (4.25)$$

Обираємо калорифер типу СФО – 250, що має потужність $E=250$ кВт та тепловий коефіцієнт корисної дії $\eta_{\text{к}} = 0,75$ [30].

Тоді кількість електрокалориферів розраховується як:

$$n_{\text{к}} = \frac{Q}{E \cdot \eta_{\text{к}}}, \quad (4.26)$$

Остаточна кількість калориферів приймається у більшу сторону.

Питомі витрати абсолютно сухого повітря, кг_{пов.}/кг в.:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad (4.27)$$

Загальна витрати теплового агента, кг_{пов.}/с:

$$L = l \cdot M_{\text{в}} \quad (4.28)$$

4.3.4 Розрахунок робочої швидкості та об'ємних витрат теплового агенту

Критерій Архімеда для еквівалентного діаметра частинок в шарі:

$$\text{Ar} = \frac{g \cdot D_{\text{е}}^3 \cdot (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{газ}})}{\nu_{\text{газ}}^2 \cdot \rho_{\text{т}}}, \quad (4.29)$$

де $\nu_{\text{газ}}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості газового агента при середній температурі в камері гранулятора, м²/с;

$\rho_{\text{газ}}$ – густина газового агенту при середній температурі в апараті, кг/м³;

Критерій Рейнольдса початку псевдозрідження для еквівалентного діаметра частинок в шарі матеріалу:

$$\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{\text{Ar}}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{\text{Ar}}} \quad (4.30)$$

Критична швидкість початку псевдозрідження для еквівалентного діаметра частинок в шарі матеріалу, м/с:

$$W_{кр} = \frac{Re_{кр} \cdot \nu_{газ}}{D_e} \quad (4.31)$$

Критерій Архімеда для мінімального діаметра частинок в шарі:

$$Ar_{min} = \frac{g \cdot D_{min}^3 \cdot (\rho_{г} - \rho_{газ})}{\nu_{газ}^2 \cdot \rho_{г}}, \quad (4.32)$$

Критерій Рейнольдса початку псевдозрідження для мінімального діаметра частинок в шарі:

$$Re_{кр min} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}} \quad (4.33)$$

Критична швидкість початку псевдозрідження для мінімального діаметра в шарі, м/с:

$$W_{кр} = \frac{Re_{кр min} \cdot \nu_{газ}}{D_{min}} \quad (4.34)$$

Максимальне число псевдозрідження:

$$K_{w max} = \frac{W_{кр}}{W_{кр min}} \quad (4.35)$$

Враховуючи значення критичного числа псевдозрідження розраховуємо робочу швидкість газового агента, м/с:

$$W_p = K_w \cdot W_{кр}, \quad (4.36)$$

де K_w – число псевдозрідження, що відповідає умовам забезпечення якісного гідродинамічного режиму неоднорідного псевдозрідження ($K_w = 1,93$ – значення, одержане за результатами експериментальних досліджень).

Об'ємні витрати зріджувального агента в камері гранулятора із розмірами $A \times B \times H_0 = 0,9 \times 0,45 \times 0,9$ м, м³/с:

$$V_{пов} = w_p AB \quad (4.37)$$

За одержаним значенням об'ємних витрат зріджувального агента обираємо газодувку згідно [31].

4.3.5 Розрахунок площі апарату в зоні ГРП

Площа перерізу апарату на рівні газорозподільного пристрою знайдемо через витрати теплоносія, м²:

$$F_{a_1} = \frac{L}{\rho_r W_p} \quad (4.38)$$

де L – масові витрати повітря на процес зневоднення і грануляції, визначеного із теплового розрахунку, кг/с.

Отже, провівши відповідні розрахунки, за обраними параметрами одного модуля камери гранулятора (довжина – $A_{\text{мод}} = 0,9$ м; ширина – $B_{\text{мод}} = 0,45$ м). На рисунку 4.4 зображено загальний вигляд модуля грануляції.

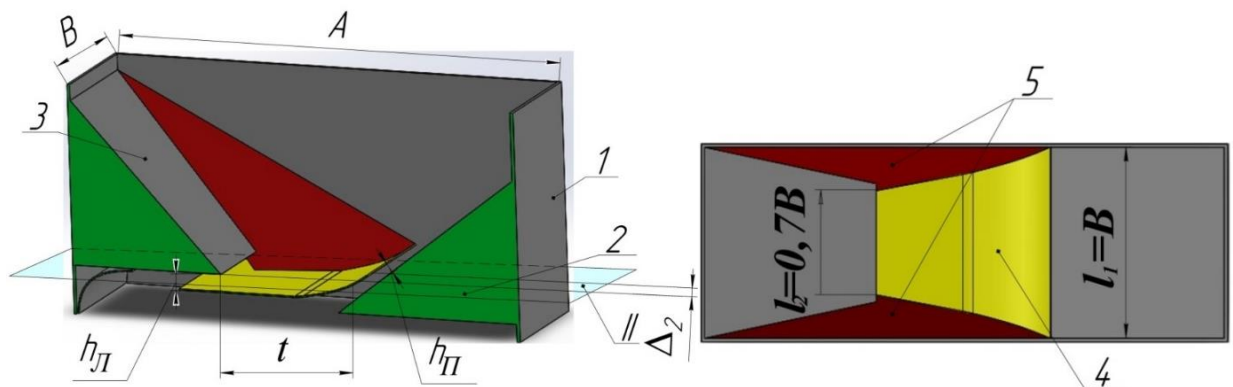
Довжина апарату, м:

$$B = \frac{F_a}{A_{\text{мод}}} \quad (4.40)$$

Звідси кількість модулів грануляції розраховується як:

$$n = \frac{B}{B_{\text{мод}}} \quad (4.41)$$

Остаточне число кількості модулів вибираємо з округленням до найближчого більшого цілого n_m .



1 – корпус апарату; 2 – правий колосник; 3 – лівий колосник; 4 – пластина ГРП; 5 – бокова похила вставка

Рисунок 4.4 – Схематичне зображення модуля грануляції на рівні ГРП

Остаточне число кількості модулів вибираємо з округленням до найближчого більшого цілого n_m .

Перераховуємо площу апарату на рівні ГРП, m^2 :

$$F_a = n_m \cdot A_{mod} \cdot B_{mod} \quad (4.42)$$

4.3.6 Розрахунок основних розмірів ГРП

Основним завданням розрахунку є визначення геометричних розмірів щілин ГРП: ширини – h_1, h_2 та довжини – B_1, B_2 .

Так як кінетична енергія газового теплоносія дорівнює потенціальній ($E_k = E_n$) на висоті пробою газового факела z_ϕ , що дорівнює $1/3H_0$ висоти шару матеріалу в апараті, розрахуємо його швидкість в щілинах ГРП.

Враховуючи, що енергії потоку газу $E_k = E_n$, тоді:

$$\frac{\rho_{газ} \cdot w_{щ}^2}{2} = z_\phi \cdot \rho_T \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot g \quad (4.43)$$

З рівняння (4.43) одержимо значення швидкості теплоносія в щілинах ГРП, m/s :

$$w_{щ} = \sqrt{\frac{2 \cdot z_\phi \cdot \rho_T \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot g}{\rho_{газ}}} \quad (4.44)$$

Площа живого перерізу ГРП, рисунок 4.4, становить $\phi = 4,9\%$. Тоді загальна площа входу зріджувального агенту через щілини ГРП, m^2 :

$$F_{щ} = \frac{V_{пов}}{w_{щ}} \quad (4.45)$$

Тоді площа щілин для одного модуля, m^2 :

$$F_{щ(мод)} = \frac{F_{щ}}{n_m}, \quad (4.46)$$

За результатами експериментальних досліджень встановлено співвідношення кінетичної енергії теплоносія у першій щілині ($E_{к1}$) до кінетичної енергії теплоносія в другій щілині ($E_{к2}$) – $E_{к1}/E_{к2} = 1,417$, що відповідає

співвідношенню поверхні проходу зріджувального агенту через щілини ГРП (F_1 та F_2):

$$E_{\kappa 1} = \frac{(w_{\text{щ}} \cdot h_1 \cdot B_1) \cdot \rho_{\text{ГАЗ}} \cdot w_{\text{щ}}^2}{2} \quad (4.47)$$

$$E_{\kappa 2} = \frac{(w_{\text{щ}} \cdot h_2 \cdot B_2) \cdot \rho_{\text{ГАЗ}} \cdot w_{\text{щ}}^2}{2} \quad (4.48)$$

$$\frac{E_{\kappa 1}}{E_{\kappa 2}} = \frac{h_1 \cdot B_1}{h_2 \cdot B_2} = \frac{F_1}{F_2} = 1.417, \quad (4.49)$$

де h_1, h_2 – ширина першої та другої щілин, м; $B_1 = 0,75B_{\text{мод}}$ та $B_2 = B_{\text{мод}}$ – довжини щілин, м; F_1 – площа першої щілини, м²; F_2 – площа другої щілини, м².

Враховуючи рівняння (4.49) знайдемо площу кожної із щілин ГРП, м²:

$$F_2 = \frac{\Sigma F_{\text{щ}}}{(1,417 + 1)} \quad (4.50)$$

Звідси

$$F_1 = \Sigma F_{\text{щ}} - F_2 \quad (4.51)$$

Згідно (4.64) ширина першої та другої щілини, м:

$$h_2 = \frac{F_2}{B_{\text{мод}}} \quad (4.52)$$

$$h_1 = \frac{F_1}{0,75B_{\text{мод}}}. \quad (4.53)$$

4.3.7 Гідравлічний розрахунок апарата

Основний гідравлічний опір апарату складається із опору шару твердих частинок та газорозподільного пристрою.

Гідравлічний опір шару, Па:

$$P_{\text{ш}} = (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{газ}}) \cdot g \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot H_{\text{ш}0} \quad (4.54)$$

Швидкість теплоносія у щілинах ГРП, м/с:

$$W_{\text{щ}} = \frac{V_{\text{р}}}{F_{\text{щ}}} \quad (4.55)$$

Гідравлічний опір газорозподільного пристрою, Па:

$$\Delta P_{\text{грп}} = \xi_2 \frac{W_{\text{ш}}^2 \cdot \rho_{\text{газ1}}}{2}, \quad (4.56)$$

де ξ_2 – коефіцієнт гідравлічного опору ГРП. Для заданої конструкції становить $\xi_2 = 2,15$.

Тоді сумарний гідравлічний опір гранулятора (без циклонів) буде, Па:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{\text{грп}} + \Delta P_{\text{ш}} \quad (4.57)$$

Витрати потужності, кВт:

$$N = \frac{\sum \Delta P \cdot V_p}{1000} \quad (4.58)$$

Індекс потужності, що характеризує витрати потужності на 1 кг готової продукції, кВт/(кг гран. продукту):

$$i_N = \frac{N \cdot 3600}{G_2} \quad (4.59)$$

4.3.8 Розрахунок діаметрів штуцерів введення та виведення теплоносія із гранулятора

Метою розрахунку є визначення діаметрів штуцерів, які забезпечать введення та виведення теплоносія.

Кількість штуцерів для введення теплоносія в апарат дорівнює кількості модулів грануляції.

Діаметр штуцера для введення теплоносія, м:

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot V_p}{\pi \cdot W_{\text{рек}} \cdot n_T}}, \quad (4.60)$$

де $W_{\text{рек}}$ – рекомендована швидкість руху повітря, $W_{\text{рек}} = 25 - 30$ м/с [32];

V_p – середня об'ємна витрата вологого повітря, м³/с.

Оскільки густина теплоносія перед входом в апарат і після мало відрізняються, то діаметр штуцера для виведення теплоносія розраховується за виразом, м:

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot V_p}{\pi \cdot W_{\text{рек}}}}, \quad (4.61)$$

де $W_{\text{рек}}$ – рекомендована швидкість руху повітря, $W_{\text{рек}} = 25 - 30$ м/с [32].

Специфікація до складального креслення промислового гранулятора наведена у додатку Ж.

4.4 Висновки

1. Виконано опис технологічної схеми промислової установки для виготовлення гуміново-мінеральних добрив нового покління.
2. Проведено розрахунок конструктивно-технологічних параметрів гранулятора продуктивністю 2 т/год, що працює в струменево-пульсаційному режимі псевдозрідження.
3. Удосконалено алгоритм розрахунку блочно-модульної конструкції камери гранулятора для одержання гуміново-мінеральних добрив з рідких гетерогенних систем.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі по підвищенню стійкості та ефективності процесу грануляції та надійності роботи гранулятора при застосуванні неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі при п'ятикратному перевищенні висоти шару зернистого матеріалу висоти пробою газового струменя.

1. Обґрунтовано спосіб взаємодії газового агенту із гранульованим матеріалом в апараті із псевдозрідженим шаром, за якого реалізується струменево-пульсаційний автоколивальний режим із циклічним імпульсним перенесенням у надшаровий простір не менше 30 % від маси шару із частотою $1,55 \dots 1,85$ Гц за відношення висоти пробою газового струменя до висоти шару матеріалу $z_{\phi}/H_0 \leq 0,21$;

2. Експериментально встановлено вплив висоти зернистого матеріалу на динаміку зміни порозності та індекс перемішування в базових зонах апарату при п'ятикратному перевищенні висоти шару H_0 висоти пробою газового факела z_{ϕ} ;

3. Експериментально встановлено, що при $z_{\phi}/H_0 \leq 0.21$, розмір газової бульбашки утвореної при злитті струменів перевищує $1/3$ ширини апарата і автоколивальний струменево-пульсаційний режим трансформується в квазі поршневий;

4. Експериментально доведено доцільність застосування оцінки якості гідродинаміки із застосуванням функції Тагуті;

5. Дослідним шляхом встановлено, що для забезпечення циркуляційного руху зернистого матеріалу необхідно дотримуватись умови $(z_{\phi} + \Delta)/H_0 \geq 0,375$;

6. Експериментально встановлено, що підвищення висоти нерухомого шару на 30% потребує адекватне підвищення швидкості газу в щілинах ГРП;

7. Експериментально підтверджено адекватність математичної моделі для розрахунку пульсаційної динаміки зміни загального перепаду тиску;

8. Струменево-пульсаційне псевдозрідження при $z_{\phi}/H_0 \leq 0.21$ при зневодненні та грануляції розчинів сульфату амонію дозволить отримати гранульований продукт з $d_e = 1.5-2.0$ мм з рівномірним розподіленням компонентів при міцності 12-17 Н при коефіцієнті гранулоутворення $\psi \geq 92\%$;

9. Завдяки застосуванню струменево-пульсаційного режиму досягається питома навантаження шару за вологою $a_f = 0,55 \div 0,6$ (кг вол.)/(м² год), що в 1,6 рази перевищує ці показники для барботажного режиму;

10. За результатами досліджень удосконалена методика розрахунку технолого-конструктивних характеристик промислового апарату для одержання гуміново-мінеральних добрив нового покоління;

11. Під час виконання дисертаційної роботи було розроблено стартап-проект «Spray Granulation Product».

ВЫВОДЫ

Диссертационная работа направлена на решение важной научно-технической задачи по повышению устойчивости и эффективности процесса грануляции и надежности работы гранулятора при применении неоднородного струйно-пульсационного псевдоожижения в автоколебательном режиме при пятикратном превышении высоты слоя зернистого материала высоты пробоя газовой струи.

1. Обоснован способ взаимодействия газового агента с гранулированным материалом в аппарате с псевдоожиженным слоем, при котором реализуется струйно-пульсационный автоколебательный режим с циклическим импульсным переносом в надслоевое пространство не менее 30 % от массы слоя с частотой 1,55...1,85 Гц за отношение высоты пробоя газовой струи до высоты слоя материала $z_{\phi}/H_0 \leq 0,21$;

2. Экспериментально установлено влияние высоты зернистого материала на динамику изменения порозности и индекс перемешивания в базовых зонах аппарата при пятикратном превышении высоты слоя H_0 высоты пробоя газового факела z_{ϕ} ;

3. Экспериментально установлено, что при $z_{\phi}/H_0 \leq 0,21$, размер газового пузыря образованной при слиянии струй теплоносителя превышает 1/3 ширины аппарата и автоколебательный струйно-пульсационный режим трансформируется в квази поршневой;

4. Экспериментально доказана целесообразность применения оценки качества гидродинамики с применением функции Тагути;

5. Опытным путем установлено, что для обеспечения циркуляционного движения зернистого материала необходимо соблюдать условия $(z_{\phi} + \Delta)/H_0 \geq 0,375$;

6. Экспериментально установлено, что повышение высоты неподвижного слоя на 30% требует адекватное повышение скорости газа в щелях ГРУ;

7. Экспериментально подтверждена адекватность математической модели для расчета пульсационной динамики изменения общего перепада давления;

8. Струйно-пульсационное псевдоожижения при $z_{\phi}/H_0 \leq 0.21$ при обезвоживании и грануляции растворов сульфата аммония позволит получить гранулированный продукт с $d_e = 1.5-2.0$ мм с равномерным распределением компонентов при прочности 12-17 Н при коэффициенте грануляции $\psi \geq 92\%$.

9. Благодаря применению струйно-пульсационного режима достигается удельная нагрузка слоя по влаге $a_f = 0,55 \div 0,6$ (кг вол.)/(м² ч), что в 1,6 раза превышает эти показатели для барботажного режима;

10. По результатам исследований усовершенствована методика расчета технолого-конструктивных характеристик промышленного аппарата для получения гуминово-минеральных удобрений нового поколения;

11. Во время выполнения диссертационной работы был разработан стартап-проект «Spray Granulation Product».

CONCLUSIONS

The dissertation is aimed at solving important scientific and technical challenges to improve the sustainability and efficiency of the granulation process and reliability of the pellet mill in the application of a non-uniform jet-pulsed fluidization in self-oscillating mode five times in excess of the height of layer of granular material of height of the breakdown of the gas jet.

1. Justified way of interacting gas agent with granular material in the apparatus with fluidized bed, in which the realization of jet-pulse self-oscillating mode with cyclic pulse transfer adserve space not less than 30 % by weight of the layer with a frequency of 1.55 – 85 Hz for the ratio of the height of the breakdown of the gas jet to the height of the layer of material $z_{\phi}/H_0 \leq 0,21$;

2. It was established experimentally the influence of the height of granular material at the dynamics of voids and the index of mixing in the core zones of the apparatus at five times the excess layer height H_0 of the height of the breakdown of the gas torch z_{ϕ} ;

3. It was established experimentally that when $z_{\phi}/H_0 \leq 0,21$ the size of the gas bubble formed at the confluence of the streams exceeds 1/3 of the width of the device and the oscillatory jet fluctuation regime transfor in quasi piston;

4. Experimentally proved the feasibility of assessing the quality of hydrodynamics with application of Taguchi;

5. Empirically established that, to ensure the circulating motion of granular material must comply with conditions $(z_{\phi}+A)/H_0 \geq 0,375$;

6. It was established experimentally that the increase in height of the fixed bed at 30% requires an adequate increase in gas velocity in the fracture cracks;

7. Experimentally confirmed the adequacy of the mathematical model to calculate pulsating the dynamics of changes in total pressure drop;

8. Jet-polsacie of fluidization when $z_{\phi}/H_0 \leq 0,21$ dehydration and granulation of solutions of ammonium sulfate will allow you to obtain a granulated product with $d_e = 1.5-2.0$ mm with a uniform distribution of components in the strength of 12-17 N with coefficient granulocytopenia $\psi \geq 92\%$;

9. Thanks to the use of jet-pulse mode is achieved by the unit load layer by wet $a_f = 0,55 \div 0,6$ (kg·moisture.)/(m² ·h), which is 1,6 times higher than the indicators for the bubbling regime;

10. According to research results, improved method of calculating industrial apparatus for producing humic-mineral fertilizers of new generation.

11. During the execution of the thesis work was developed by the startup project "Spray Granulation Product".

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ